

Trabajo Fin de Máster  
Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

# EFECTOS DEL OLEAJE EN LA EROSIÓN/SEDIMENTACIÓN EN ISLA CANELA

Autor: Ramón Romero Ortiz

Tutora: Carmen Zarzuelo Romero

**Dpto. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019











Trabajo Fin de Máster  
Ingeniería de Caminos Canales y Puertos

# **EFFECTOS DEL OLEAJE EN LA EROSIÓN/SEDIMENTACIÓN EN ISLA CANELA**

Autor:  
Ramón Romero Ortiz

Tutora:  
Carmen Zarzuelo Romero  
Profesora sustituta interina

Dpto. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Máster: EFECTOS DEL OLEAJE EN LA EROSIÓN/SEDIMENTACIÓN EN ISLA  
CANELA

Autor: Ramón Romero Ortiz

Tutora: Carmen Zarzuelo Romero

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*  
*A mis amigos*



# AGRADECIMIENTOS

---

En primer lugar, quiero agradecer a toda mi familia que me han dado todo el apoyo y la fuerza a lo largo de estos 7 años para poder acabar tanto el Grado en Ingeniería Civil como ahora este Máster en Ingeniería de Caminos Canales y Puertos. A mis padres, a mi hermana y en especial a mi abuela que, aunque por poco no haya podido llegar a ver como su nieto termina la carrera, ha estado ahí día y noche, rezando y dando apoyo para que así fuera.

De igual modo, agradecer a mis amigos de siempre, a todos esos de Mairena, por estar también siempre ahí y en épocas malas mostrar su apoyo y confianza en mí.

Agradecer también a todos esos compañeros que me han acompañado en este viaje por la Escuela, con los que he compartido horas de estudio, clases y como no diversión. Tanto los del Máster como los del Grado.

Por otro lado, agradecer a todos esos profesores que me han ayudado a formarme, a aprender y querer de la forma que lo hago la profesión a la cual le dedicare mi futuro.

Por último, agradecer enormemente todo el apoyo y la paciencia que ha mostrado conmigo mi tutora Carmen Zarzuelo, quien ha sido la que ha hecho posible que este Trabajo de Fin de Máster saliese adelante.

Muchísimas gracias a todos y sobre todo...

¡GRACIAS A TI, ABUELA!





La evolución de la playa de Isla Canela desde la segunda mitad del Siglo pasado ha sido objeto de numerosas intervenciones que han dado como fruto grandes retrocesos de la línea de costa. El encauzamiento de los ríos Guadiana y Carreras en los años 70 produjo una disminución en el aporte de sedimentos en la zona de estudio. Tanto la construcción del espigón de Vila Real de Sto. Antonio como la existencia del delta sumergido de la desembocadura del Guadiana provocan que el oleaje incidente en la costa se vea refractado de forma irregular, invirtiendo las direcciones naturales del transporte de sedimentos y provocando la alternancia de zonas de erosión y sedimentación a lo largo de la costa de Isla Canela. Con el fin de conocer la influencia del oleaje en la morfología de la costa, se plantea este Trabajo de Fin de Máster.

Para el alcanzar dicho objetivo se desarrolla en primer lugar un estudio del clima marítimo de la zona, basándose en las variables más representativas del oleaje (alturas de ola, periodos pico y direcciones), el viento (velocidades y direcciones) y los regímenes mareales. Se desarrolla una descripción general del oleaje en aguas profundas, un análisis del régimen medio de la zona, y otro análisis del régimen extremal. Por último, se analiza la influencia tanto del viento predominante como de la marea.

El rango de alturas de ola registrado en aguas profundas comprende valores entre 0 y 7,80 m, siendo las más frecuentes aquellas entre 0,25 y 1,25 m, produciéndose en el 76% de los casos. Los periodos oscilan entre los 2 y 19,70 sg, siendo los más frecuentes entre 4 y 8 sg, produciéndose en el 63% de los casos. Las direcciones de procedencia más frecuentes para el oleaje son del O (42% del tiempo), OSO (15% del tiempo) y SE (13% del tiempo).

Para el régimen medio escalar se obtiene que la altura de ola cuya probabilidad de no excedencia es del 50% es 0,80 m y la altura de ola cuya probabilidad de no excedencia es del 80%, es 1,55 m. Se han analizado las tres direcciones de oleaje más predominantes. Para la dirección O es de 0,70 m la altura de ola con probabilidad de no excedencia del 50% y 1,15 m para el 80%. Para la dirección OSO la altura de ola con probabilidad de no excedencia del 50%, es de 1,10 m y de 2,10 m para el 80%. Por último, para los oleajes de dirección SE, la altura de ola con probabilidad de no excedencia del 50%, es de 1,05 m y de 1,85 para probabilidades del 80%. En cuanto al régimen extremal, en aguas profundas, se obtiene una probabilidad de excedencia del 50% para valores de altura de ola de 4,00 m y del 75% para alturas de ola superiores a los 4,50 m.

Definido el clima marítimo, se obtienen los valores de las tormentas las cuales se tiene registro contemplando dos escenarios: uno entre los años 1977 y 2009 y otro entre el año 2009 y 2015. La elección de estos escenarios se debe a un análisis comparativo con datos facilitados por la Junta de Andalucía.

Para la caracterización de las tormentas se utiliza el método Peaks Over Threshold (Picos Sobre el Umbral). Este método filtra las alturas de ola de un registro que superan un determinado valor “umbral”. En este caso se toma como umbral aquella altura de ola que es superada en el 1% de los casos (3,30 m). Con el fin de garantizar la independencia entre tormentas, se toma como mínimo una separación entre picos de 36 h.

Obtenidos los valores de los temporales, se implementa un modelo de propagación de oleaje de la zona a través del software Delft3D (WAVE). Este modelo permite conocer las características del oleaje en la costa. Para dar fiabilidad a los resultados obtenidos, el modelo se calibra para los valores de altura de ola, periodo pico y dirección del oleaje. De la calibración se obtiene un coeficiente de correlación medio de  $R^2 = 0,80$  y parámetro de Skill  $S = 0,79$ . Con el modelo calibrado se desarrolla la propagación de los estados de mar correspondientes a cada una de las tormentas registradas en cada uno de los escenarios.

Para el cálculo de la tasa de erosión o sedimentación en cada uno de los escenarios se ha utilizado la formula del CERC (Coastal Engineering Research Center, 1984). Se trata de una formulación empírica basada en la hipótesis de que el transporte longitudinal de sedimentos de una playa es directamente proporcional al flujo de energía que se genera en la zona de rompientes. De este modo para la aplicación de la fórmula es necesario conocer los valores de altura de ola y dirección en rotura del oleaje en el perfil donde se quiera calcular.

En este trabajo se han tomado a lo largo de la costa un total de 8 perfiles en los que se ha calculado para cada una de las tormentas el valor de la tasa de erosión o sedimentación que se produce. Obtenido los valores de la tasa de transporte en cada perfil, se analiza entre cada perfil si existe déficit o superávit de sedimentos y por tanto dicho tramo se encuentra en erosión o sedimentación. Obtenido los valores discretos, se interpolan a lo largo de toda la línea de la costa y se obtienen el patrón de la playa. Una vez se tiene ese patrón, se han comparado con los que ofrece el REDIAM (Junta de Andalucía, 2010), los cuales están calculados a partir del análisis de ortofotografías.

Coincidiendo con REDIAM, se diferencian en la costa dos zonas según su tasa de erosión. La parte de levante, caracterizada por altos valores de sedimentación fomentados por la contención que ofrece el espigón de Punta del Moral, y la parte de poniente, que ha visto modificada su alineación de forma más brusca a través de la formación de dos tómbolos y el retroceso considerable de la línea de costa en el tramo comprendido entre ellos.

De este modo, se finaliza el trabajo mostrando unas conclusiones globales sobre el estado de la playa de Isla Canela a medio plazo.

# ABSTRACT

---

The adjacent beachside town of Ayamonte, Isla Canela, has evolved over the last decades due to numerous engineering interventions. These mentioned interventions have controlled the water levels at the shore along with a displacement of soil for its later protection to the urban context. Back in the 1970s one of the interventions was the joinery of two rivers, Guadiana and Carreras, causing an abrupt reduction in the natural transportation of mineral sediments in the area.

The construction of the breakwater in Vila Real de Sto. Antonio, along with the condition of the submerged delta at the mouth of the Guadiana river, caused over the years that the wave incident over the coast of Isla Canela to be refracted irregularly by reversing the natural direction of mineral sediment transportation. Reversing these natural transportations of sediments has caused an abrupt alternation of erosion and sedimentation zones throughout the coast line of Isla Canela.

This final thesis is aiming to study the influence of waves in the morphology of the coast. In order to undertake this study, the most important meteorological factors would be carefully taken under consideration; being the following:

Research on the maritime climate conditions in the study area based on the most representative variables of the waves (heights, peak periods and directions) along with tidal regimes. There will also be a general description of the surge in deep waters, an analysis of the average regime of the area along with a study of extreme regimes. The last part of research will be based on the predominant direction and speed of the wind in the area, along with the tides.

The documented range in wave heights in deep waters show values between 0 and 7.80 m, having at 76% of the studied cases the values from 0.25 to 1.25 m. The periods oscillate between 2 and 19.70 s, being the most frequent directions of origin for waves are W (42% of the time), OSO (15% of the time) and SE (13% of the time).

As for the average scalar regime, it is obtained from wave heights whose probability of non-exceedance are 50% at 0.8 meters and the wave heights whose probability of non-exceedance are 80% at 1.55 m. There are three predominant directions in the study area where there has been an analysis and values obtained from it. For W direction the wave height is 0.70 m with a 50% probability of non-exceedance and 1.15 m at 80% of probability of not exceeding. For OSO direction, the wave height with probability of not exceeding 50% is 1.10 m and 2.10 m for 80% of non-exceedance. The final direction on this study case is SE, where the wave heights have a non-exceedance probability of 50% at 1.05 m and for a probability of 80% the height peaks at 1.85 m. As for the extreme regime, in deep waters the probability of exceeding at 50% is obtained from wave height values at 4.00 m and for a 75% probability the heights are greater than 4.50 m.

Once we have defined the maritime climate, the values gathered from storms bring two scenarios to be taken under consideration: the first one being set between 1977 and 2009 and the second one between 2009 and 2015. This choice of the mentioned cases will be a comparative analysis between both, with the data of the analysis being provided by the Junta de Andalucía. For the characterization of storms, the Peaks Over Threshold method is used. This method filters the wave heights of record values that exceed a certain 'threshold' value. In our case, the wave height is taken as a threshold, which is exceeded in 1% of the cases (at 3.30 meters). In order to

guarantee the independence between storms, a gap of at least 36 hours between peaks is taken under consideration.

Once the storm values are gathered, a wave propagation model in the study area is developed through the Delft3D software (WAVE). This model allows to know the characteristics of the waves at the coast. To obtain a higher reliability to the obtained results, the model is calibrated for the values of wave heights, peak periods and direction of waves. The calibration results in a mean correlation coefficient of  $R^2 = 0.80$  and skill parameter of  $S = 0.79$ . With the calibrated model, the propagation of the sea conditions corresponding to each of the storms under study in each of the scenarios developed and analysed.

As for the calculation of erosion and sedimentation rates in each scenario, the CERC formula (Coastal Engineering Research Center, 1984) has been applied. This is an empirical formulation based on the hypothesis that the longitudinal transport of sediments from the beach is directly proportional to the flow of energy generated in the surf zone. With the mentioned facts under consideration, the formula is applied when the obtained values of wave heights and directions in breakage of the waves depending on the scenario that is meant to be defined.

In this Final Thesis, a total of 8 cases have been analysed along the coast where the values of erosion or sedimentation rates have been calculated for each of the mentioned storms or scenarios. Once these values have been obtained, the transport rate on each case has been studied and compared with one another to check if there is a deficit or surplus of sediments and therefore this section would be classified to be suffering from erosion or sedimentation. When the values are obtained, they are interpolated along the whole coast line and the beach pattern is achieved. Finally, once the pattern is present, it is then compared with those offered by REDIAM (Junta de Andalucía, 2010), which are obtained from the analysis of orthophotos.

After the careful analysis and studies, this Thesis aims to conclude showing global conclusions about the state of Isla Canela beach in medium term.

# ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS .....	VII
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT .....	XI
ÍNDICE .....	XIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIX
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Objeto y alcance</i> .....	1
1.2 <i>Localización</i> .....	2
1.3 <i>Evolución histórica de la zona</i> .....	4
1.4 <i>Situación actual</i> .....	8
<b>2 ZONA DE ESTUDIO .....</b>	<b>11</b>
2.1 <i>Topografía y batimetría</i> .....	11
2.2 <i>Geología</i> .....	12
2.3 <i>Caracterización del fondo marino</i> .....	14
2.4 <i>Caracterización del sedimento (<math>D_{50}</math>)</i> .....	15
<b>3 METODOLOGÍA DEL ESTUDIO .....</b>	<b>17</b>
3.1 <i>Clima marítimo</i> .....	17
3.1.1 <i>Datos de partida</i> .....	17
3.1.2 <i>Descripción general en aguas profundas</i> .....	18
3.1.3 <i>Régimen medio</i> .....	19
3.1.4 <i>Régimen extremal</i> .....	19
3.2 <i>Escenario de simulación</i> .....	19
3.3 <i>Modelo numérico de propagación</i> .....	20
3.3.5 <i>Calibración del modelo</i> .....	20
3.4 <i>Cálculo del transporte de sedimentos</i> .....	22
3.5 <i>Tasa de erosión o sedimentación</i> .....	23
3.6 <i>Análisis de los resultados</i> .....	24
<b>4 CLIMA MARÍTIMO.....</b>	<b>27</b>
4.1 <i>Datos de partida</i> .....	27
4.2 <i>Oleaje</i> .....	28
4.2.1 <i>Descripción general del oleaje en aguas profundas</i> .....	28
4.2.2 <i>Régimen medio anual de <math>H_s</math> en aguas profundas</i> .....	35
4.2.3 <i>Régimen extremal anual de <math>H_s</math> en aguas profundas</i> .....	41
4.3 <i>Viento</i> .....	43
4.3.4 <i>Descripción general del viento en aguas profundas</i> .....	43
4.4 <i>Mareas</i> .....	46
<b>5 MODELO NUMÉRICO .....</b>	<b>49</b>
5.1 <i>Datos de entrada</i> .....	50
5.1.1 <i>Mallado (grid)</i> .....	50
5.1.2 <i>Batimetría</i> .....	51

5.1.3	Condiciones de contorno.....	52
5.1.4	Obstáculos .....	52
5.1.5	Parámetros del modelo .....	53
5.1.6	Punto de control.....	54
5.2	<i>Calibración del modelo</i> .....	54
5.2.7	Resultados de la calibración .....	56
<b>6</b>	<b>ANÁLISIS DEL MODELO .....</b>	<b>57</b>
6.1	<i>Propagación del oleaje</i> .....	57
6.1.1	Escenario 1: 1977 – 2009.....	58
6.1.2	Escenario 2: 2009 – 2015.....	65
6.2	<i>Obtención de los parámetros en rotura</i> .....	72
6.3	<i>Transporte de sedimentos</i> .....	76
6.3.3	Escenario 1: 1977 – 2009.....	77
6.3.4	Escenario 2: 2009 – 2015.....	78
6.4	<i>Gradiente de sedimentación</i> .....	79
6.4.5	Escenario 1: 1977 – 2009.....	80
6.4.6	Escenario 2: 2009 – 2015.....	81
<b>7</b>	<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>85</b>
7.1	<i>Comparación con REDIAM</i> .....	85
7.2	<i>Comparación Escenario 1 y Escenario 2</i> .....	87
7.2.1	Propagación del oleaje.....	87
7.2.2	Sedimentación/Erosión.....	94
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>97</b>
8.1	<i>Clima marítimo</i> .....	97
8.2	<i>Modelo numérico</i> .....	98
8.3	<i>Escenarios</i> .....	98
8.4	<i>Tasa de erosión</i> .....	98
<b>Apéndice A:</b>	<b>Red de puertos del estado.....</b>	<b>101</b>
A.1.	<i>Procedencia y obtención del conjunto SIMAR</i> .....	101
A.2.	<i>Subconjunto SIMAR-44</i> .....	101
A.2.1.	Viento .....	101
A.2.2.	Oleaje .....	102
A.3.	<i>Parámetros disponibles del SIMAR</i> .....	102
A.4.	<i>Procedencia y obtención del conjunto REDMAR</i> .....	103
A.5.	<i>Parámetros disponibles de REDMAR</i> .....	103
<b>Apéndice B:</b>	<b>Ecuaciones del modelo .....</b>	<b>105</b>
B.1.	<i>Ecuación de balance de acción</i> .....	105
B.1.1.	Transferencia de energía al oleaje debida al viento .....	106
B.1.2.	Interacciones no lineales entre olas.....	107
B.1.3.	Disipación de energía .....	109
<b>Apéndice C:</b>	<b>Parámetros del modelo .....</b>	<b>113</b>
C.1.	<i>Descripción (Description)</i> .....	113
C.2.	<i>Hidrodinámica (Hydrodynamics)</i> .....	113
C.3.	<i>Mallado (Grid)</i> .....	113
C.3.1.	Mallado computacional (Computational grid).....	113
C.3.2.	Batimetría (Bathymetry) .....	114
C.3.3.	Resolución del espectro (Spectral resolution).....	114
C.3.4.	Anidado de mallas (Nesting).....	114
C.3.5.	Hidrodinámica (Hydrodynamics) .....	114
C.4.	<i>Espacio temporal (Time frame)</i> .....	114
C.5.	<i>Condiciones de contorno (Boundaries)</i> .....	115
C.6.	<i>Obstáculos (Obstacles)</i> .....	115

C.7.	<i>Parámetros físicos (Physical parameters)</i> .....	115
C.7.1.	Constantes (Constants) .....	115
C.7.2.	Viento (Wind).....	116
C.7.3.	Procesos (Processes) .....	116
C.7.4.	Varios (Various).....	116
C.8.	<i>Parámetros numéricos (Numerical parameters)</i> .....	116
C.9.	<i>Curvas de salida (Output curves)</i> .....	117
C.10.	<i>Parámetros de salida (Output parameters)</i> .....	117
<b>Apéndice D: Resultados de propagación .....</b>		<b>119</b>
D.1.	<i>Escenario 1</i> .....	119
D.2.	<i>Escenario 2</i> .....	133
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>137</b>





# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1 Caracterización del sedimento de Isla Canela (MAGRAMA, 2013)	16
Tabla 2 Coordenadas de los perfiles de calculo	24
Tabla 3 Coordenadas de los puntos SIMAR utilizados (Puertos del Estado, 2019)	27
Tabla 4 Dispersión de los valores de Hs frente a Tp	31
Tabla 5 Dispersión de los valores de Hs frente a Dirección media de oleaje	32
Tabla 6 Dispersión de los valores de Hs frente a Tp	33
Tabla 7 Frecuencias de altura de ola SIMAR 5026019	34
Tabla 8 Frecuencias de direcciones medias del oleaje SIMAR 5026019	34
Tabla 9 Frecuencias de periodos pico del oleaje SIMAR 5026019	35
Tabla 10 Parámetros del ajuste Weibull para el régimen medio	36
Tabla 11 Parámetros del ajuste Weibull para el régimen medio	41
Tabla 12 Parámetros del ajuste Gumbel para el régimen extremal	42
Tabla 13 Dispersión de los valores de Vv frente a direcciones medias del viento	44
Tabla 14 Frecuencias de velocidades medias del viento SIMAR 5026019	45
Tabla 15 Frecuencias de direcciones medias del viento SIMAR 5026019	45
Tabla 16 Armónicos de marea con amplitudes mayores de 2 cm en mareógrafo Huelva 5	47
Tabla 17 Armónicos de marea con amplitudes mayores de 2 cm en la playa de Isla Canela	47
Tabla 18 Parámetros de modelización de los obstáculos del modelo	53
Tabla 19 Valores de los coeficientes de ajuste para alturas de ola	55
Tabla 20 Valores de los coeficientes de ajuste para periodos	55
Tabla 21 Valores de los coeficientes de ajuste para direcciones del oleaje	55
Tabla 22 Valores extremos de las alturas de ola en los puntos de control en Escenario 1	61
Tabla 23 Valores extremos de las alturas de ola en los puntos de control en Escenario 2	68
Tabla 24 Valores del parámetro de rotura en cada uno de los perfiles	73
Tabla 25 Valores de los parámetros para formulación del CERC de cada uno de los perfiles	76
Tabla 26 Tasa de sedimentación para distintas direcciones en los perfiles en el Escenario 1	77
Tabla 27 Tasa de sedimentación para distintas direcciones en los perfiles en el Escenario 2	78
Tabla 28 Valores de la erosión/sedimentación entre cada uno de los perfiles en el Escenario 1	80
Tabla 29 Déficit o superávit de transporte longitudinal entre cada uno de los perfiles en el Escenario 2	82
Tabla 30 Valores extremos de las alturas de ola en los puntos de control en Escenario 2	90
Tabla 31 Valores de erosión/sedimentación medio anual en cada uno de los tramos	94
Tabla 32 Valores de erosión/sedimentación medio anual en cada uno de los tramos	95
Tabla 33 Volumen de sedimentos de aportación a la zona costera por el río Guadiana	96



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1 Localización Costa Occidental de Huelva y la playa Isla Canela (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, 2014)	3
Figura 2 Zonificación de la zona de estudio	3
Figura 3 Evolución histórica de la desembocadura del río Guadiana (Morales González, 2008)	4
Figura 4 Caracterización del estuario del Guadiana (Ojeda Zujar & Malvarez García, 2005)	5
Figura 5 Evolución de la playa del dique de Portugal (González, Dias, & Ferreira, 2001)	6
Figura 6 Ortofoto 1956	6
Figura 7 Ortofoto 1977	6
Figura 8 Ortofoto 1985	7
Figura 9 Ortofoto 1997	7
Figura 10 Ortofoto 2002	7
Figura 11 Ortofoto 2005	7
Figura 12 Ortofoto 2007	7
Figura 13 Ortofoto 2009	7
Figura 14 Ortofoto 2011	7
Figura 15 Ortofoto 2013	7
Figura 16 Ortofoto 2016	8
Figura 17 Ortofoto 2019	8
Figura 18 Evolución reciente de la playa de Isla Canela (Centro de Estudios de Puertos y Costas, 2013)	9
Figura 19 Detalle de la protección de la línea de costa (2007 izquierda 2011 derecha)	10
Figura 20 Línea de costa actual e la playa de Isla Canela	10
Figura 21 Carta náutica 441 del Guadiana a la ría de Huelva (Instituto Hidrográfico de la Marina, 1983)	12
Figura 22 Batimetría de la zona de estudio	12
Figura 23 Esquema geológico regional de la zona de estudio (Instituto Geológico y Minero de España, 1983)	13
Figura 24 Detalle del mapa geológico de la zona de estudio (Instituto Geológico y Minero de España, 1983)	14
Figura 25 Leyenda del mapa geológico de la zona de estudio (Instituto Geológico y Minero de España, 1983)	14
Figura 26 Unidades litológicas del fondo marino frente a la costa de Isla Canela (Junta de Andalucía, 2010)	15
Figura 27 Localización de las muestras tomadas para caracterización del sedimento	15
Figura 28 Situación general puntos SIMAR y REDMAR empleados (Puertos del Estado, 2019)	17
Figura 29 Localización mareógrafo Huelva 5 (Puertos del Estado, 2019)	18

Figura 30 Diagrama de flujos de la calibración y ajuste del modelo	21
Figura 31 Perfiles de cálculo en la playa de Isla Canela	24
Figura 32 Localización de los puntos SIMAR utilizados	27
Figura 33 Niveles de referencia altimétrica del mareógrafo Huelva 5 (Puertos del Estado, 2019)	28
Figura 34 Serie temporal completa altura de ola significativa SIMAR 5026019	29
Figura 35 Gráfica de dispersión Hs frente a Tp SIMAR 5026019	29
Figura 36 Gráfica de dispersión Hs frente a dirección media SIMAR 5026019	29
Figura 37 Gráfica de dispersión Tp frente a dirección media SIMAR 5026019	30
Figura 38 Rosa de oleaje SIMAR 5026019	30
Figura 39 Histograma de altura de ola significativa SIMAR 5026019	34
Figura 40 Histograma de dirección media del oleaje SIMAR 5026019	34
Figura 41 Histograma de periodos pico del oleaje SIMAR 5026019	35
Figura 42 Función de densidad para el régimen medio escalar	37
Figura 43 Función de distribución para el régimen medio escalar	37
Figura 44 Ajuste función Weibull para el régimen medio escalar	37
Figura 45 Función de densidad para el régimen direccional O	38
Figura 46 Función de distribución para el régimen direccional O	38
Figura 47 Ajuste función Weibull para el régimen direccional O	38
Figura 48 Función de densidad para el régimen direccional OSO	39
Figura 49 Función de distribución para el régimen direccional OSO	39
Figura 50 Ajuste función Weibull para el régimen direccional OSO	39
Figura 51 Función de densidad para el régimen direccional SE	40
Figura 52 Función de distribución para el régimen direccional SE	40
Figura 53 Ajuste función Weibull para el régimen direccional SE	40
Figura 54 Temporales en los registros de altura de ola significativa	41
Figura 55 Función de densidad para el régimen extremal	42
Figura 56 Función de distribución para el régimen direccional SE	42
Figura 57 Gráfica de dispersión Vv frente a DirV SIMAR 5026019	43
Figura 58 Rosa de vientos SIMAR 5026019	43
Figura 59 Histograma de velocidades medias del viento SIMAR 5026019	45
Figura 60 Histograma de direcciones medias del viento SIMAR 5026019	45
Figura 61 Nivel del mar, marea astronómica y marea meteorológica del mareógrafo Huelva 5	46
Figura 62 Marea astronómica del mareógrafo Huelva 5	47
Figura 63 Mallado anidado de la zona de estudio	50
Figura 64 Batimetría de la malla exterior desde aguas profundas	51
Figura 65 Batimetría de la malla de Isla Canela	52
Figura 66 Obstáculos simulados dentro de la zona de estudio	53
Figura 67 Comparación de alturas de ola según diferentes coeficientes de Collins	54
Figura 68 Comparación de alturas de ola según diferentes coeficientes de Collins	54
Figura 69 Comparación de alturas de ola según diferentes coeficientes de Collins	55

Figura 70 Puntos de control del oleaje en la playa de Isla Canela	57
Figura 71 Altura de ola en aguas profunda en el Escenario 1	58
Figura 72 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 1 en el punto 1	58
Figura 73 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 1 en el punto 2	59
Figura 74 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 1 en el punto 3	59
Figura 75 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 1 en el punto 4	59
Figura 76 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 1 en el punto 5	60
Figura 77 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 1 en el punto 6	60
Figura 78 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 1 en el punto 7	60
Figura 79 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 1 en el punto 8	61
Figura 80 Rosa de oleaje en el Escenario 1 en los puntos 1 y 2	62
Figura 81 Rosa de oleaje en el Escenario 1 en los puntos 3 y 4	62
Figura 82 Rosa de oleaje en el Escenario 1 en los puntos 5 y 6	63
Figura 83 Rosa de oleaje en el Escenario 1 en los puntos 7 y 8	63
Figura 84 Función de densidad de probabilidad en el Escenario 1 en los puntos 1 y 2	64
Figura 85 Función de densidad de probabilidad en el Escenario 1 en los puntos 3 y 4	64
Figura 86 Función de densidad de probabilidad en el Escenario 1 en los puntos 5 y 6	64
Figura 87 Función de densidad de probabilidad en el Escenario 1 en los puntos 7 y 8	65
Figura 88 Altura de ola en aguas profunda en el Escenario 2	65
Figura 89 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 2 en el punto 1	66
Figura 90 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 2 en el punto 2	66
Figura 91 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 2 en el punto 3	66
Figura 92 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 2 en el punto 4	67
Figura 93 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 2 en el punto 5	67
Figura 94 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 2 en el punto 6	67
Figura 95 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 2 en el punto 7	68
Figura 96 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 2 en el punto 8	68
Figura 97 Rosa de oleaje en el Escenario 2 en los puntos 1 y 2	69
Figura 98 Rosa de oleaje en el Escenario 2 en los puntos 3 y 4	70
Figura 99 Rosa de oleaje en el Escenario 2 en los puntos 5 y 6	70
Figura 100 Rosa de oleaje en el Escenario 2 en los puntos 7 y 8	70
Figura 101 Función de densidad de probabilidad en el Escenario 2 en los puntos 1 y 2	71
Figura 102 Función de densidad de probabilidad en el Escenario 2 en los puntos 3 y 4	71
Figura 103 Función de densidad de probabilidad en el Escenario 2 en los puntos 5 y 6	72
Figura 104 Función de densidad de probabilidad en el Escenario 2 en los puntos 7 y 8	72
Figura 105 Perfil playa 29/Junio/1989 correspondiente al perfil 1	73
Figura 106 Perfil playa 29/Junio/1989 correspondiente al perfil 2	74
Figura 107 Perfil playa 29/Junio/1989 correspondiente al perfil 3	74
Figura 108 Perfil playa 29/Junio/1989 correspondiente al perfil 4	74
Figura 109 Perfil playa 29/Junio/1989 correspondiente al perfil 5	75

Figura 110 Perfil playa 29/Junio/1989 correspondiente al perfil 6	75
Figura 111 Perfil playa 29/Junio/1989 correspondiente al perfil 7	75
Figura 112 Perfil playa 29/Junio/1989 correspondiente al perfil 8	76
Figura 113 Valores de la tasa de sedimentación longitudinal en el Escenario 1	78
Figura 114 Valores de la tasa de sedimentación longitudinal en el Escenario 2	79
Figura 115 Representación de los valores extremos de sedimentación/erosión en el Escenario 2	80
Figura 116 Tasa de erosión por tramos en el Escenario 1 (unidades de m <sup>3</sup> /sg)	81
Figura 117 Representación de los valores extremos de sedimentación/erosión en el Escenario 2	82
Figura 118 Esquema de erosión sedimentación por tramos en el Escenario 2 (unidades de m <sup>3</sup> /sg)	83
Figura 119 Comparación de la tasa de erosión en Isla Canela según REDIAM y Escenario 1	86
Figura 120 Comparativa histogramas de alturas de ola Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 1	87
Figura 121 Comparativa histogramas de alturas de ola Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 2	88
Figura 122 Comparativa histogramas de alturas de ola Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 3	88
Figura 123 Comparativa histogramas de alturas de ola Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 4	88
Figura 124 Comparativa histogramas de alturas de ola Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 5	89
Figura 125 Comparativa histogramas de alturas de ola Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 6	89
Figura 126 Comparativa histogramas de alturas de ola Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 7	89
Figura 127 Comparativa histogramas de alturas de ola Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 8	90
Figura 128 Comparativa extremos de alturas de ola en Escenario 1 y Escenario 2	91
Figura 129 Comparativa histogramas de direcciones Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 1	91
Figura 130 Comparativa histogramas de direcciones Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 2	92
Figura 131 Comparativa histogramas de direcciones Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 3	92
Figura 132 Comparativa histogramas de direcciones Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 4	92
Figura 133 Comparativa histogramas de direcciones Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 5	93
Figura 134 Comparativa histogramas de direcciones Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 6	93
Figura 135 Comparativa histogramas de direcciones Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 7	93
Figura 136 Comparativa histogramas de direcciones Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 8	94
Figura 137 Tasa de erosión/sedimentación en Escenario 1 (azul) y Escenario 2 (naranja) a lo largo de la costa	96

# 1 INTRODUCCIÓN

---

La erosión de la costa es un proceso natural que se traduce en el retroceso de la línea de costa debido fundamentalmente a la acción directa del oleaje, corrientes y el viento.

En las playas de arena, el equilibrio de la línea de costa depende de la cantidad de material que se deposita en la orilla procedente de otras fuentes (bancos de arena, otras playas, acantilados erosionados, etc.) y la que migra de esa zona a otra. El responsable de ello es el transporte longitudinal de sedimentos que discurre paralelo a la costa y que depende de la energía del oleaje incidente y del tipo de sedimento de la playa.

De este modo, si el balance de sedimentos es positivo, la línea de costa tiende a desplazarse agua adentro (sedimentación) y si es negativo, ésta retrocede (erosión).

La erosión de la costa se produce principalmente cuando los vientos alcanzan velocidades extremas, alturas de ola extremas (poca probabilidad de excedencia) y mareas vivas. A estos estados climatológicos o de mar se les conoce como temporales y serán el objeto de estudio del presente trabajo.

Con el paso del tiempo, la sucesión de este tipo de temporales implica que la costa cambie de forma continua y que se mantenga en una tendencia erosiva o sedimentaria.

La tasa de erosión se mide habitualmente en volumen/tiempo, aunque también se puede encontrar en unidades de m/año, refiriéndose de ese modo a los m de ancho que se mueve la línea de costa en planta en un año.

La actividad humana en la zona costera en general ha convertido el fenómeno natural de la erosión en un problema social cada vez más importante. La urbanización, los puertos deportivos y comerciales, así como todas las actividades económicas asociadas al turismo de costa, tienen cada vez un peso mayor en las zonas de playa, lo que obliga al desarrollo de obras para la protección de la costa tales como espigones, diques o rompeolas. Estas actuaciones en la costa alteran de la dinámica natural sedimentaria de provocando que la costa cambie, buscando un nuevo equilibrio con nuevas zonas de erosión y sedimentación.

Así pues, las modificaciones de las playas son el resultado de una combinación de factores, tanto naturales como antropogénicos, que actúan a diferentes escalas temporales y geográficas.

A partir de ello, podemos clasificar las playas según su estado morfodinámico como playas en equilibrio o playas en proceso de adaptación a sus condicionantes externos.

El caso de la playa de Isla Canela es una playa en proceso de adaptación ya que se encuentra en un proceso de adaptación desde los años 70. Es durante esos años cuando se construyen los espigones de la desembocadura del río Guadiana y el río Carreras. Ambas intervenciones, unidas a la complejidad del fondo marino de la zona, han provocado que a lo largo de la costa de Isla Canela se alternen zonas con grandes tasas de erosión y otras de sedimentación.

De igual manera, el efecto de los bajos asociados al delta sumergido del Guadiana provoca grandes cambios en la dirección del oleaje (refracción) que hacen que el oleaje cambie su dirección natural de incidencia con la costa, convirtiendo de ese modo la zona de Isla Canela en una zona compleja e interesante para analizar.

## 1.1 Objeto y alcance

El presente T.F.M. lleva por objeto el estudio sobre el estado morfodinámico en el que se encuentra la costa de Isla Canela.

Para ello se desarrolla un estudio del oleaje, del viento y de las mareas de la zona. Posteriormente se genera un modelo para la propagación del oleaje desde aguas profundas hasta aguas someras y se obtienen los valores de la rotura del mismo.

Propagado el oleaje, se calcula el transporte longitudinal de sedimentos dividiéndose la playa en un total de ocho perfiles equidistantes en la costa y se caracterizará el frente costero según su estado morfodinámico. La clasificación de la costa divide a ésta en zonas de erosión o sedimentación.

El trabajo cumple de este modo los siguientes objetivos:

- Estudio morfológico de la zona de estudio (unidades fisiográficas, obras costeras, descripción de playas, etc.).
- Análisis y descripción del clima marítimo de la zona y obtención de los valores característicos del mismo.
- Desarrollo del modelo de propagación de oleaje en la zona de estudio.
- Calibración del modelo a través de datos conocidos en un punto de la zona de estudio.
- Estudio de la dinámica litoral de la costa a través de los valores de tasa de transporte longitudinal de sedimentos.
- Comparativa con los datos oficiales de la Junta de Andalucía (REDIAM) en relación con la erosión y vulnerabilidad de la costa.
- Conclusiones.

El alcance del documento se fijará en el estudio del régimen extremal correspondiente a dos escenarios temporales según los siguientes periodos:

- Escenario 1                      1977 – 2009
- Escenario 2                      2009 – 2015

El fundamento de la elección de ambos escenarios se debe a dos motivos que se indican a continuación.

Primero de todo, la costa de Isla Canela ha sufrido numerosas modificaciones a lo largo de las últimas décadas a través de las cuales ha visto modificada su batimetría y su morfología. De este modo, la batimetría que se tiene acceso es una batimetría actual, definiéndose como actual a aquella posterior a los años 70. De este modo, carece de sentido estudiar un escenario anterior a esa fecha con una batimetría que poco tiene que ver con la que había entonces.

Por otro lado, el análisis de los resultados que se llevará a cabo se fundamenta entre otras cosas en un análisis comparativo con los datos facilitados por parte de REDIAM de la Junta de Andalucía. Esta base de datos pública ofrece resultados de vulnerabilidad de la costa a lo largo de los años comprendidos en el escenario 1, de modo que con el fin de desarrollar un análisis y una comparación lo más realista posible se toman esas fechas como primer escenario de estudio.

A fin de validar y obtener una evolución posterior al año 2009, se extiende el análisis mediante un segundo escenario que abarcará hasta que se tienen registros (2015).

Para cada escenario se calcula la propagación y las tasas de sedimentación correspondientes, y se desarrollan diversos análisis comparativos de los resultados obtenidos.

## 1.2 Localización

Isla Canela es un entorno costero que se encuentra al Sur del término municipal de Ayamonte (Huelva). Pertenece al paraje natural de las Marismas de Isla Cristina, que están muy influenciadas por las mareas atlánticas, la actividad fluvial del río Guadiana y la acción del oleaje y del viento (Figura 1).

La playa de Isla Canela forma parte del Litoral Occidental de la costa de Huelva. Está incluida dentro de la desembocadura del río Guadiana, y se extiende hasta la desembocadura del río Carreras al Este (Figura 2).

La alineación media de la costa se puede dividir en tres tramos, describiendo en un primer lugar la zona de la desembocadura una alineación con acimut aproximado de 135° (NO – SE). En segundo lugar, entre los tómbolos de poniente y levante (Figura 2), la alineación corresponde con un acimut prácticamente de 90° (O – E). Por último, superado el tómbolo de levante hasta llegar al espigón de punta del Moral, el acimut de la línea de costa es de 75° (SSO – ENE).





### 1.3 Evolución histórica de la zona

La playa de Isla Canela, a pesar de formar parte del término municipal de Ayamonte que goza de varios siglos de historia, aparece hace poco más de 260 años a partir del llamado “terremoto de Lisboa”.

El epicentro del terremoto se situó apenas a unos kilómetros de distancia, en el océano atlántico y cerca de la costa portuguesa provocando una ola gigantesca de más de 15 m de altura, que arrasó con parte de la costa occidental de Huelva. Con ello desapareció la Isla de San Bruno, y apareció una nueva Isla a la que se le llamó Isla Canela.

Desde la segunda mitad del Siglo XX, la costa occidental de Huelva ha visto como el turismo de playa se ha incrementado de forma muy notable convirtiéndose en uno de los pilares fundamentales, económicamente hablando, de muchos de los pueblos de la costa.

Es por ello por lo que, a lo largo de las últimas décadas, la zona de Isla Canela ha sido fruto de modificaciones a través de diversas actuaciones de ingeniería marítima. Estas actuaciones han influido de forma directa en la evolución morfológica de la misma.

En la Figura 3 se observa de forma esquemática la evolución de la desembocadura del río Guadiana entre los años 1755 y 1998.

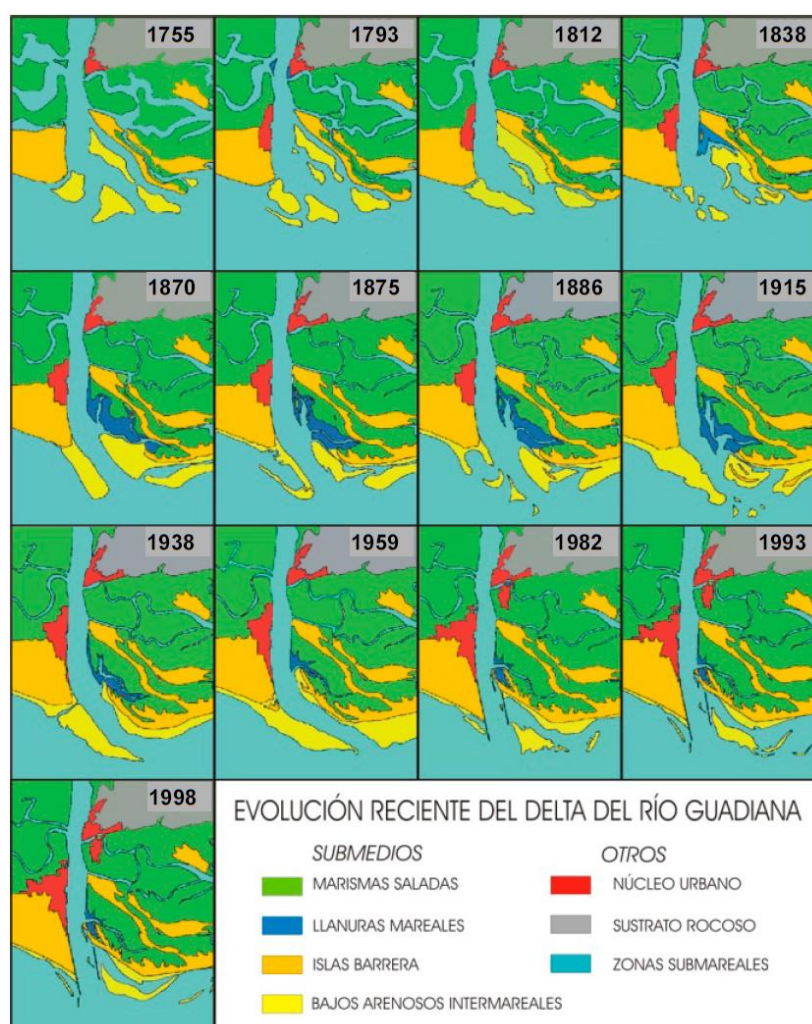


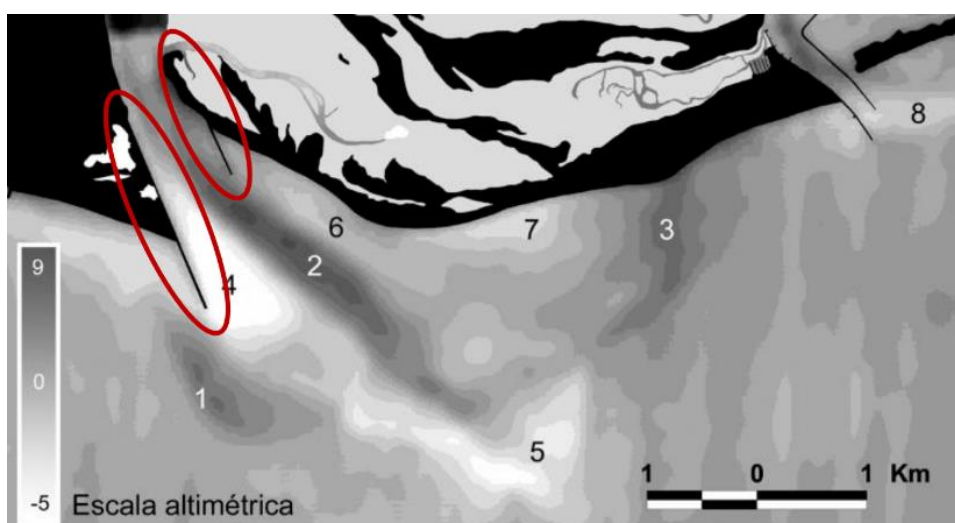
Figura 3 Evolución histórica de la desembocadura del río Guadiana (Morales González, 2008)

Analizando las actuaciones que se han desarrollado y tomando como documentos de apoyo tanto las diferentes imágenes aéreas existentes de la zona, las cuales se muestran desde la Figura 6 a la Figura 17, como los diferentes informes emitidos por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente del Gobierno de España (Centro de Estudios de Puertos y Costas, 2013) se pasa a desarrollar una breve definición cronológica de los diferentes acontecimientos experimentados en la zona de estudio.

La desembocadura del río Guadiana se ha ido colmatando a lo largo del tiempo por los aportes del propio río, así como por los aportes de sedimentos derivados de la dinámica costera, principalmente provenientes de la zona occidental a la desembocadura (zona portuguesa).

Estos fenómenos han hecho que se hayan ido formando en la desembocadura y en la playa de Isla Canela continuos bajos y flechas litorales que han influido en la alineación de la costa, destacando entre ellos el “Banco do O’Bril” con un carácter fuertemente dinámico (Ojeda Zujar & Malvarez García, 2005).

Estos bancos de sedimentos que se desarrollaban en la desembocadura del río hacían que la navegabilidad de éste se viera comprometida en innumerables ocasiones. Entre los años 1974 y 1976 se intenta poner solución a través de la construcción de un dique de escollera que partía de la margen portuguesa con dirección SSE y poco más de 2 Km de longitud (2.040 m). Este dique cortaba la flecha que en aquel momento se formaba y que cortaba la navegabilidad del canal. Al mismo tiempo se construye un contradique sumergido de unos 900 m de longitud en la zona española, creando en el estuario del río un canal para la navegación (Figura 4).



*Figura 4 Caracterización del estuario del Guadiana (Ojeda Zujar & Malvarez García, 2005)*

La construcción de los mencionados diques provoca el traslado de la zona de sedimentación frente a la costa de Isla Canela.

De igual modo, los bajos que se producían en la margen española del río, debido al corte radical del transporte longitudinal de sedimentos, modificaron su equilibrio, creciendo y moviéndose hasta alcanzar su estado actual a la vez que la acumulación de sedimento aumentaba en la zona portuguesa cifrándose dicha contención en un valor estimado de unos 120.000 m<sup>2</sup> de playa de arena seca entre los años 1974 y 1980 (González, Dias, & Ferreira, 2001) (Figura 5).

Este aumento de arena en la zona occidental de la desembocadura se traduce en un déficit de aporte de sedimentos en la zona occidental (de misma magnitud) provocando la erosión de la playa de Isla Canela, llegando a retroceder hasta 100 m de arena seca durante los últimos años del Siglo XX (Centro de Estudios de Puertos y Costas, 2013).



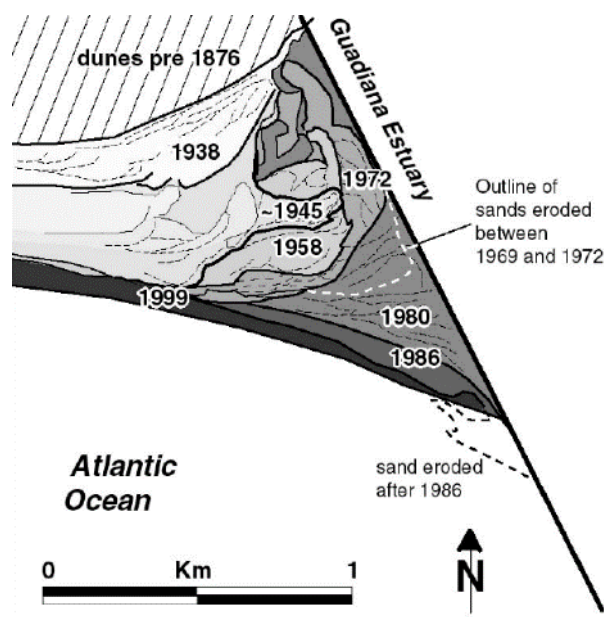


Figura 5 Evolución de la playa del dique de Portugal (González, Dias, & Ferreira, 2001)

Además de las anteriores actuaciones, en los últimos 160 años, la desembocadura del Guadiana ha sufrido grandes cambios, causados principalmente por la construcción de grandes presas en su cuenca hidrográfica entre 1955 y 1965, provocando una importante retención de sedimentos.

De igual forma que se producía en la desembocadura del Guadiana, en el río Carreras se producían continuos aterramientos de la bocana, de modo que se optó por una solución similar a la propuesta en la frontera portuguesa. De este modo se pasó a construir dos diques de escollera (el de poniente de escollera y bloques de hormigón como se muestra en la Figura 2) cuyo objetivo era el de canalizar la entrada al puerto pesquero de Isla Cristina.

La construcción del espigón de Vila Real de Sto. Antonio (Figura 2), como puede observarse entre las fotografías de 1956 y 1977 (Figura 6 - Figura 17), al igual que sucedió en la zona portuguesa con el dique del Guadiana, provocó el aumento de playa seca en la zona oriental de Isla Canela, conocida como playa de los Haraganes y Punta del Moral (Figura 2).

A continuación (Figura 6 - Figura 17), se pasa a mostrar una serie de ortofotografías históricas que ilustran los procesos descritos anteriormente.



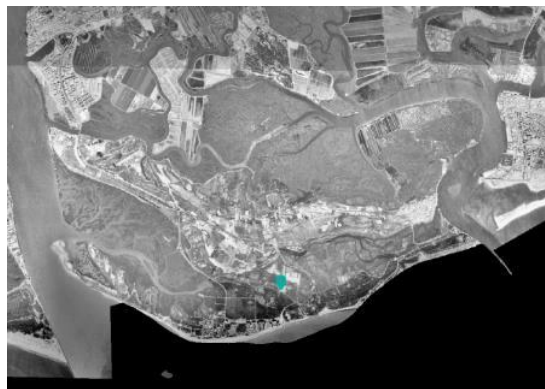
Figura 6 Ortofoto 1956



Figura 7 Ortofoto 1977



*Figura 8 Ortofoto 1985*



*Figura 9 Ortofoto 1997*



*Figura 10 Ortofoto 2002*



*Figura 11 Ortofoto 2005*



*Figura 12 Ortofoto 2007*



*Figura 13 Ortofoto 2009*



*Figura 14 Ortofoto 2011*



*Figura 15 Ortofoto 2013*





Figura 16 Ortofoto 2016



Figura 17 Ortofoto 2019

## 1.4 Situación actual

Actualmente, la playa de Isla Canela se considera una costa vulnerable desde el punto de vista de la erosión, debido principalmente a las urbanizaciones que se han ido construyendo en el trasdós de la playa, al encontrarse dentro la franja natural de ésta. Desde el punto de vista de la sedimentación también se considera vulnerable al provocar ésta posibles problemas ambientales y aterramientos.

Es en el año 2002, se acomete en la zona una regeneración de la playa a través de material de aportación proveniente de un dragado. En dicha actuación se aportó arena tanto en la zona de playa seca, así como en los bajos existentes frente a costa con el fin de mitigar los problemas de erosión que se venían sucediendo a lo largo de años anteriores.

Es en 2013, por parte de la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y el Mar, cuando se emite un informe bajo título de “Estudio de actuación del tramo de costa comprendido entre las desembocaduras de los ríos Guadiana y Guadalquivir” que recoge los principales problemas que se detectan hoy en día en la playa entre los cuales se citan los siguientes:

- El obstáculo al transporte de sedimentos que supuso la construcción del espigón en el encauzamiento de la margen portuguesa del río Guadiana, cuyas transformaciones han impedido el flujo directo natural de sedimento a través de la desembocadura a la playa.
- La disminución de aportes de sedimentos por parte del propio río Guadiana.

El déficit de sedimentos que provocó a final del siglo pasado la construcción del dique de Vila Real de Sto. Antonio (Figura 2), unido a la continua formación de bajos en la zona frente a la costa hacen que la línea de costa de las zonas más céntricas de la playa se encuentre en continuo cambio, convirtiéndolo hoy en día en uno de los mayores problemas de la playa de Isla Canela.

La evolución de la playa de Isla Canela, en concreto la zona occidental situada en la margen izquierda de la desembocadura del río Guadiana, viene a su vez condicionada por el delta sumergido que el río forma en su desembocadura. A continuación, en la Figura 18 se muestra una imagen obtenida del estudio (Centro de Estudios de Puertos y Costas, 2013) en la que se muestra la evolución de la línea de costa entre los años 2004 y 2011, ilustrando de este modo los importantes cambios a los que se ha visto sometida la playa.



Figura 18 Evolución reciente de la playa de Isla Canela (Centro de Estudios de Puertos y Costas, 2013)

Como se comprueba en la Figura 18, los bajos que forman parte del delta sumergido han fomentado que el oleaje, al llegar a las proximidades de la costa no incidan en la misma con la misma energía en puntos relativamente próximos provocando que se den zonas de la playa en las que el oleaje llega con cierta virulencia frente a otras en las que la pérdida de energía de las olas es muy elevado.

De igual modo, se comprueba también a través de las líneas discontinuas representativas de los bajos como estos se han ido aproximando a la costa cada vez más, aumentando de este modo la disparidad ya mencionada del oleaje.

El efecto que todo esto ha causado en la línea de costa ha sido la alternancia de tramos de erosión y sedimentación, provocando la formación de dos tómbolos en las zonas de sedimentación (tómbolo de poniente y tómbolo de levante como se puede observar en la Figura 2) y haciendo retroceder de forma brusca las zonas de erosión.

Es entre los años 2007 y 2011 (Figura 19) se ejecuta la obra de contención de la línea de costa a través de la construcción de un revestimiento longitudinal a base de escollera. Esta obra se justifica por los continuos problemas que estaba provocando la erosión de la zona central, llegando a alcanzar los terrenos consolidados de las urbanizaciones y los muros de las edificaciones del trasdós de la playa. Esta zona se referencia en la Figura 2 como “zona protegida con escollera”.

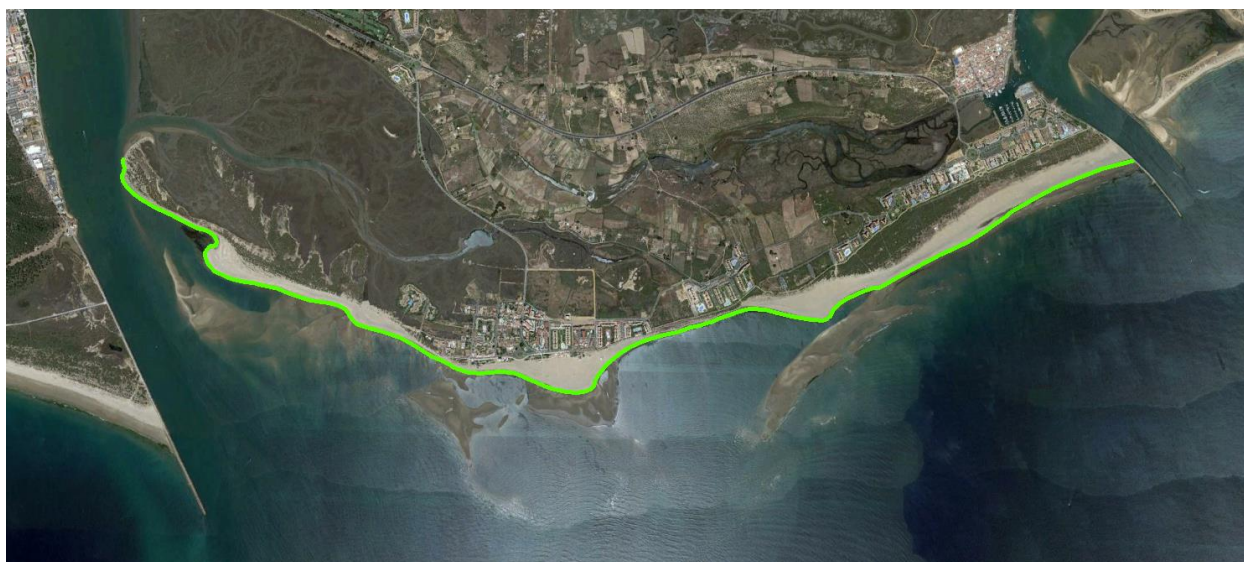
En la Figura 19 se muestran dos ortofotos de detalle de la zona afectada antes y después de la actuación.





*Figura 19 Detalle de la protección de la línea de costa (2007 izquierda 2011 derecha)*

Sometido a la protección de la zona más vulnerable, la línea de costa actualmente en la playa de Isla Canela describe en planta la forma que se muestra en la Figura 20.



*Figura 20 Línea de costa actual e la playa de Isla Canela*



## 2 ZONA DE ESTUDIO

---

Perteneciente a la costa occidental de Huelva, (costa atlántica andaluza), limitada por las desembocaduras del río Guadiana y Carreras, la costa de Isla Canela forma parte del paraje natural de las marismas de Isla Cristina, franqueadas por diversas islas barreras (Figura 1).

A su vez, frente a la desembocadura del río Guadiana se desarrolla un extenso delta sumergido, que ha sufrido migraciones a lo largo de las últimas décadas debido fundamentalmente a la construcción de los espigones.

La construcción de dichos espigones provoca un cambio en la dirección de los frentes de onda que se aproximan a la costa, refractando estos al chocar con los espigones y modificando de ese modo en ángulo de incidencia de los trenes de ondas con la costa. De este modo la consecuencia directa de la construcción de un espigón como el de Vila Real Sto. Antonio, provoca que el oleaje en la zona occidental de Isla Canela cambie su dirección y se oponga al sentido natural de la deriva litoral de la zona (Figura 3). Estas modificaciones convierten esa zona de la playa de Isla Canela en una playa con una gran pendiente con tendencia erosiva.

En la zona oriental podemos encontrar el efecto contrario donde el espigón de Punta del Moral (Figura 2), al quedar la playa al Oeste de éste, se ha convertido en una zona con un alto nivel de acumulación de sedimentos, describiendo una pendiente suave en el fondo.

Aun así, incluso en la zona más próxima a la desembocadura del río Guadiana, la playa de Isla Canela consta de gran anchura de playa seca, abundando grandes cordones dunares a su espalda que en algunas ocasiones pueden llegar a alcanzar grandes alturas.

Para el desarrollo del presente T.F.M. ha sido necesario la caracterización los factores que pueden intervenir en la dinámica litoral de la zona de estudio. Los factores que se han tenido en consideración han sido tanto el clima marítimo (capítulo 4) como la batimetría, geología y características del sedimento que se definen en este capítulo.

### 2.1 Topografía y batimetría

La información batimétrica, así como topográfica de la zona de estudio ha sido obtenida a partir de las fuentes que se citan a continuación:

- Batimetría de la costa de Huelva proporcionada por la tutora del presente trabajo Dña. Carmen Zarzuelo Romero (90 x 110 m).
- Carta Náutica digital 441 del río Guadiana a la ría de Huelva (digital), del Instituto Hidrográfico de la Marina Española. (0,50 x 0,50 millas náuticas) (Figura 21).
- Modelo Digital del Terreno del Instituto de Estadística y Cartografía de la Junta de Andalucía. (10 m/píxel).

Con el fin de obtener una representación lo más fiable posible se ha referenciado la batimetría de la zona con el cero del puerto de Isla Cristina, quedando el mismo 1,75 m por debajo del Nivel Medio del Mar en Alicante.

La zona de estudio se ha extendido hasta una profundidad media de 487,50 m coincidente con la profundidad obtenida para el punto SIMAR 5026019 (Figura 28) que se ha tomado de referencia para la propagación del oleaje, según batimetría facilitada.

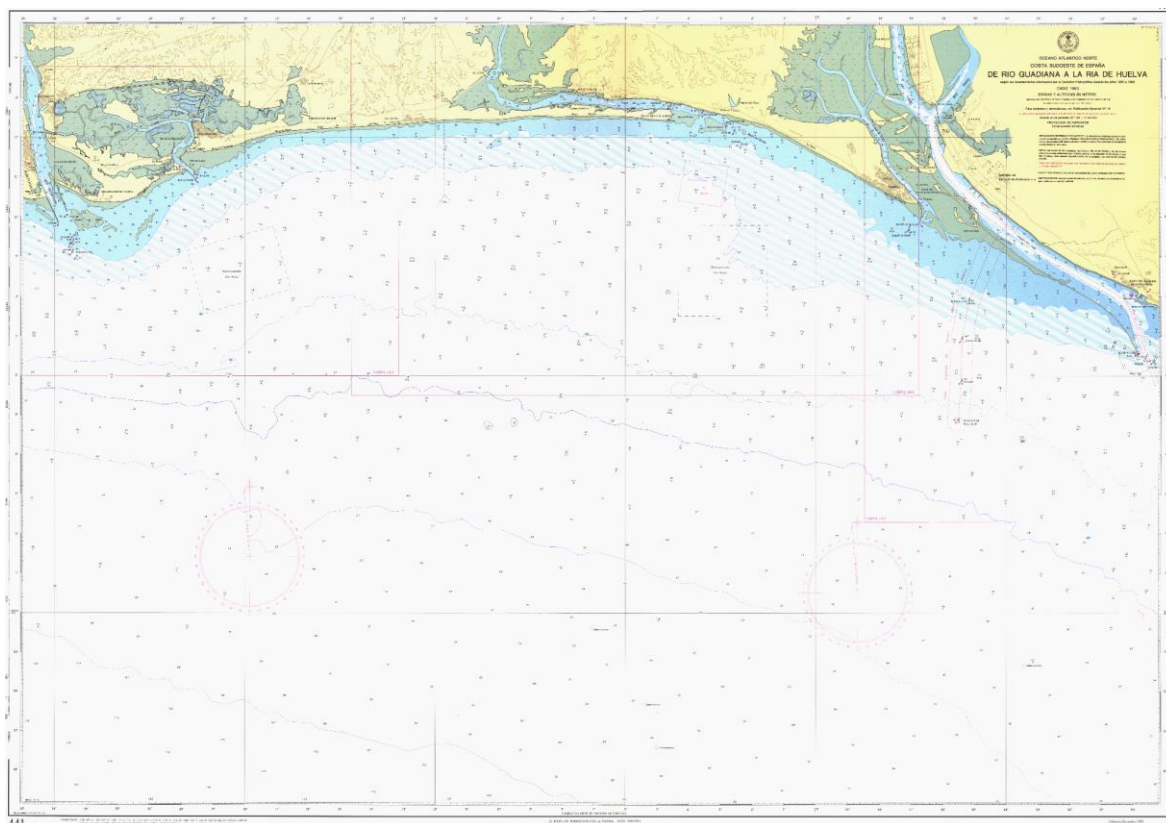


Figura 21 Carta náutica 441 del Guadiana a la ría de Huelva (Instituto Hidrográfico de la Marina, 1983)

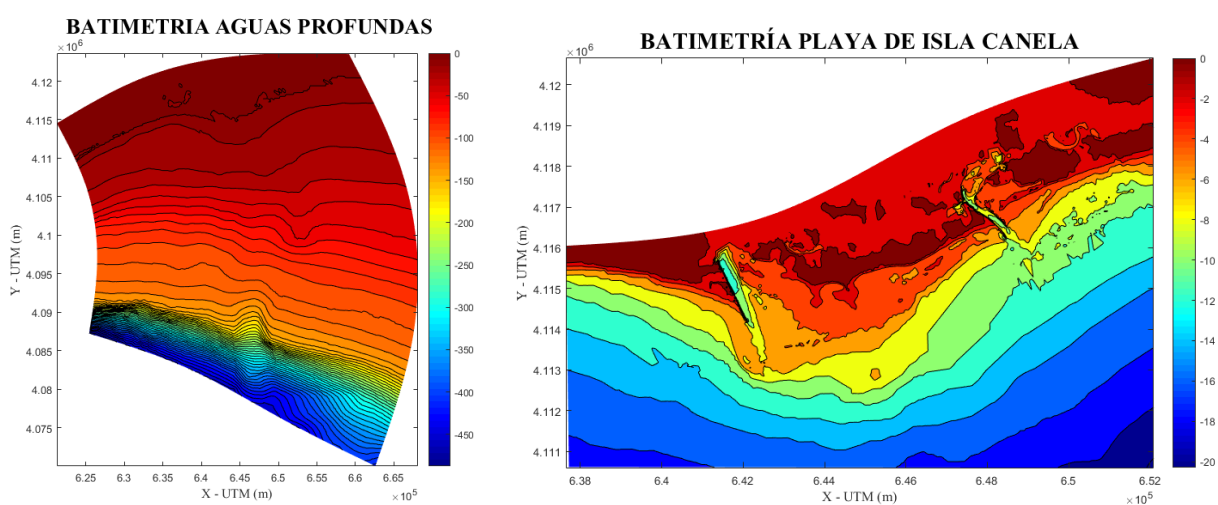


Figura 22 Batimetría de la zona de estudio

Nótese que las curvas de nivel representadas en la Figura 22 describe la batimetría de la zona, contemplándose curvas cada 10 m en la batimetr que alcanza aguas profundas (izquierda) mientras que en la batimetría de detalle de la costa de Isla Canela (derecha), las curvas de nivel se referencian cada metro, a fin de obtener una mejor percepción visual.

## 2.2 Geología

El conjunto de la zona de estudio se encuadra desde el punto de vista geográfico dentro de la depresión del Guadalquivir y la desembocadura del Guadiana.

En esta área afloran materiales fundamentalmente del cuaternario, de origen detrítico, abundando los fangos de la marisma y los depósitos fluviales del Holoceno, así como depósitos de arenas ligados a la evolución que ha sufrido a lo largo de la historia reciente el litoral (Figura 23).

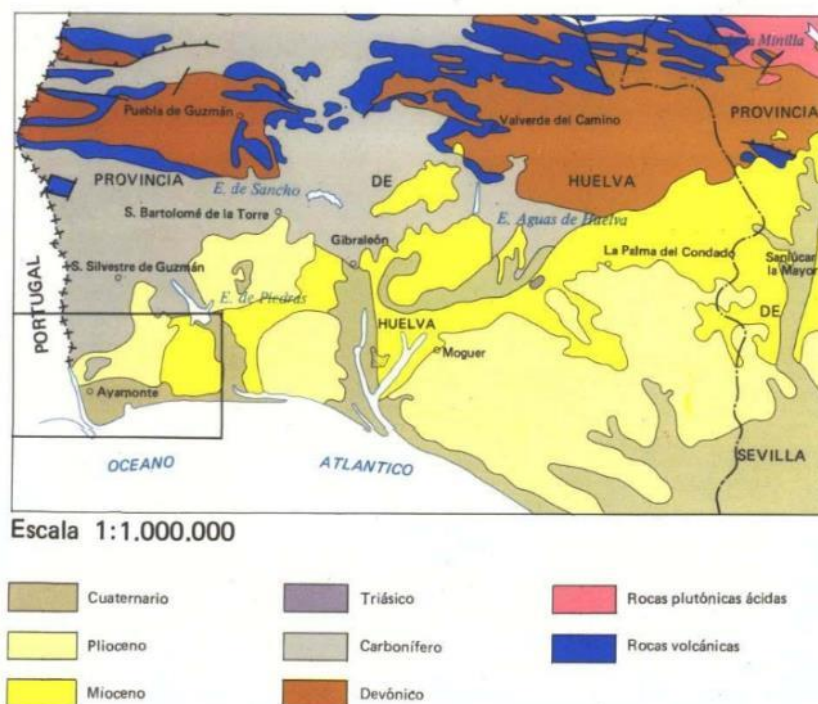


Figura 23 Esquema geológico regional de la zona de estudio (Instituto Geológico y Minero de España, 1983)

Los depósitos cuaternarios asociados a la zona fluvio-marina, están constituidos en profundidad por depósitos antiguos. Estos depósitos alternan capas fluviales de gravas y arenas, con capas marinas de arcilla y con depósitos recientes de limos arenosos y arcillas en las capas superficiales.

Para la caracterización de las distintas unidades geológicas que se dan en la playa de Isla Canela, se toma como referencia la hoja número 998 (Ayamonte) del Mapa Geológico de España a escala 1:50.000 de la serie MAGNA publicado en el año 1979 (Instituto Geológico y Minero de España, 1983).

Se ha hecho uso de la información en formato .kmz que ofrecen de cara a una mejor percepción de la zona tal y como se muestra en la Figura 24.

Para la descripción de las unidades geológicas se utiliza la memoria de la hoja ya descrita.

En cuanto a la estratigrafía (Figura 24 y Figura 25) de la playa podemos diferenciar las siguientes unidades:

- Formaciones eólicas (9 – 10): Desde el Guadiana hasta el límite oriental de la zona de estudio se extiende la barrera costera y mantos eólicos asociados, constituidos por arenas blancas con restos fósiles y abundantes minerales negros. La barrera dunar avanza desde la línea de la playa sobre la marisma. Las fluctuaciones del nivel freático debido a la influencia de las mareas y la estacionalidad de estas, así como la variación de la red de canales de mareas o distributarios del Guadiana influyen de forma decisiva en algunos casos, en el avance de los trenes dunares sobre los distintos sectores o en su degradación a manto eólico y mezcla posterior con sedimentos de la marisma. Tanto las arenas de la barrera dunar como las de los cuaternarios eólicos (manto) son de tipo subarcosa con tendencia a cuarzoarenitas con un porcentaje de minerales pesados del 1 al 2 %, siendo frecuentes la turmalina, circón rutilo...
- Medios de transición (11): Son áreas extensas que ocupan las zonas pantanosas y de marisma. La sedimentación en esas zonas es en general de lutitas y/o fangolitas verdes o azules, con laminación paralela y algunas láminas de color muy oscuras con un alto porcentaje de materia orgánica. La ausencia de sondeos en la zona no permite conocer la potencia ni la columna con detalle.

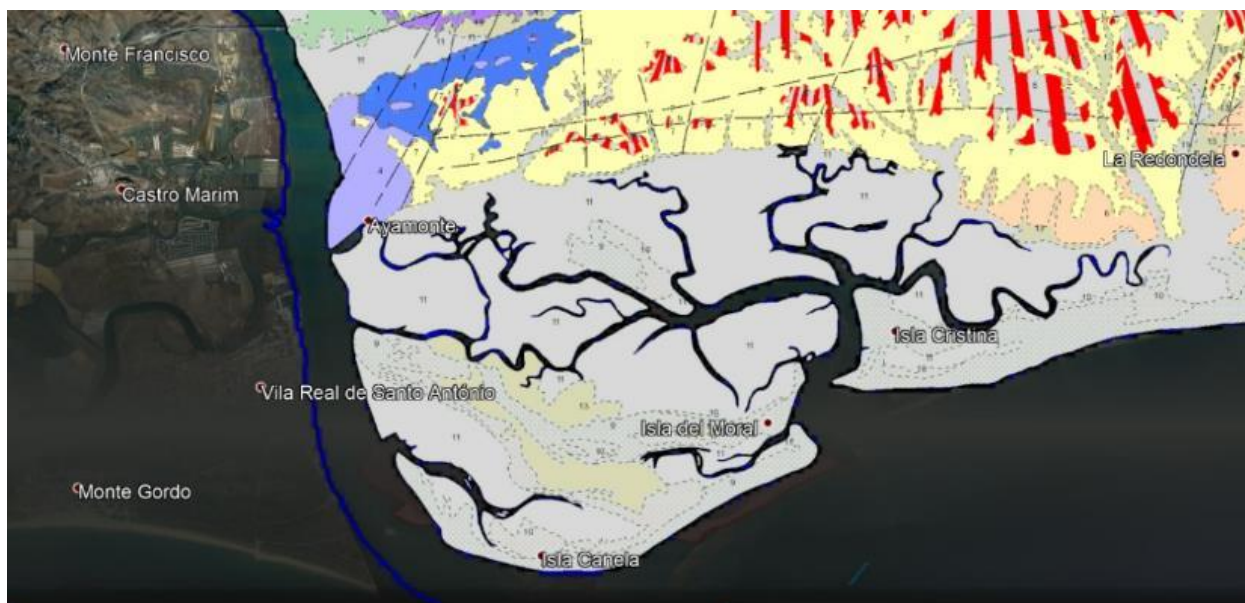


Figura 24 Detalle del mapa geológico de la zona de estudio (Instituto Geológico y Minero de España, 1983)

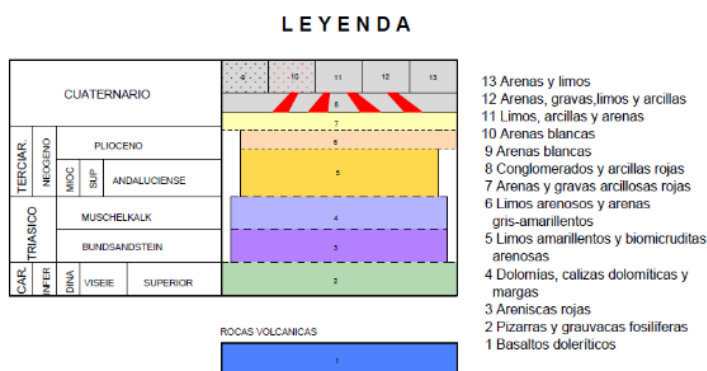


Figura 25 Leyenda del mapa geológico de la zona de estudio (Instituto Geológico y Minero de España, 1983)

## 2.3 Caracterización del fondo marino

En cuanto a la caracterización desde el punto de vista de la litología del fondo marino, haciendo uso del visor web de REDIAM (Junta de Andalucía, 2010) a través de su capa “Caracterización de fondos: Unidades litológicas”, se definen las siguientes unidades litológicas frente a la costa de Isla Canela (Figura 25).

Para la definición de las unidades litológicas se toma la información del Instituto Geológico y Minero de España (misma fuente que REDIAM).

- Arenas (1): Forman parte de toda la región meridional de la plataforma y el talud continental, así como de cinturones en la franja litoral. Se trata de sedimentos muy bien clasificados compuestos principalmente por terrígenos, en los que destaca un alto contenido en cuarzo y calcita proveniente de los caparzones de los foraminíferos.
- Fangos (2): Se trata de arcillas limosas o fangos con un contenido en arena inferior del 10%. Corresponden también con una granulometría bien clasificada. Presentan altos contenidos en filosilicatos (del orden del 60%). El mineral que tiene más presencia en estos materiales es la illita. Ocupan prácticamente la totalidad de la plataforma del sector septentrional llegando a alcanzar espesores de hasta 25 m, encontrándose en profundidades de hasta 120 m.
- Roca – calcarenitas (5): Son rocas sedimentarias con un porcentaje en carbonato cálcico inferior al 50% se presentan en grandes masas en toda la zona del valle del Guadalquivir.



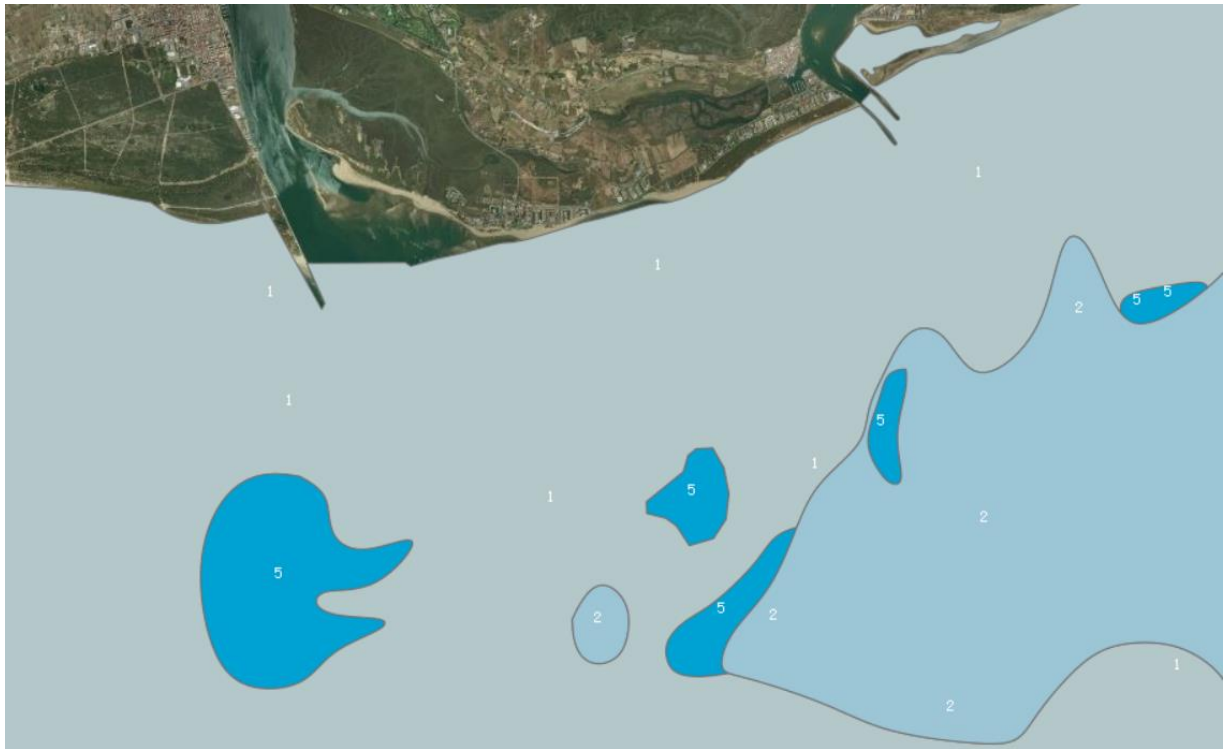


Figura 26 Unidades litológicas del fondo marino frente a la costa de Isla Canela (Junta de Andalucía, 2010)

## 2.4 Caracterización del sedimento ( $D_{50}$ )

Dado que uno de los objetivos del presente trabajo es la caracterización de la tasa de transporte, será necesario conocer el tamaño medio del sedimento de la playa. Para ello se toma como referencia el estudio desarrollado por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente y el Ministerio de Fomento de España junto con el CEDEX sobre la dinámica litoral de las playas en el tramo de costa entre la desembocadura del Guadiana y el Guadalquivir (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2013).

Para el desarrollo de dicho estudio se realizó una campaña de toma de muestras y posterior análisis granulométrico de las mismas, que permitió la caracterización de los sedimentos (Tabla 1). Los resultados de esa campaña de caracterización se han tomado como referencia en el desarrollo de este trabajo.

La campaña de toma de muestras y ensayos se realizó en el laboratorio del CEDEX durante el mes de Febrero de 2003. El número total de muestras situadas en el interior de nuestra zona de estudio son cinco y su localización se indica a continuación (Figura 27).

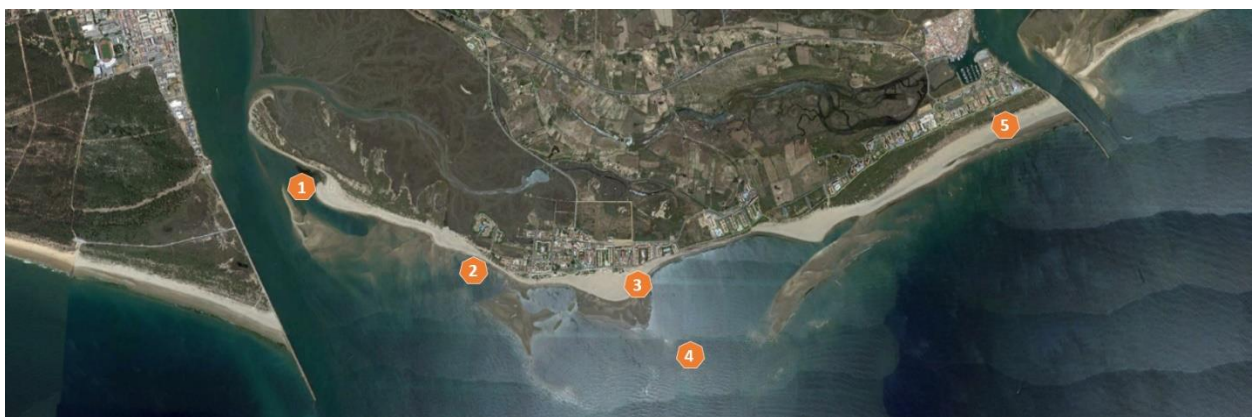


Figura 27 Localización de las muestras tomadas para caracterización del sedimento

Nº	Localización	D <sub>50</sub> (mm)	Tipo de sedimento
1	Canela (extremo oeste)	0,50	Arena media, pobremente clasificada, simétrica y mesocúrtica
2	Canela	0,42	Arena fina, bien clasificada, desviada a gruesos y leptocúrtica
3	Canela (extremo este)	0,90	Arena media, pobremente clasificada, simétrica y mesocúrtica
4	Canela (bajos)	0,35	Arena fina, bien clasificada, simétrica y mesocúrtica
5	Punta del Moral	0,35	Arena fina, bien clasificada, simétrica y platocúrtica

*Tabla 1 Caracterización del sedimento de Isla Canela (MAGRAMA, 2013)*

En general los resultados muestran categorías de arenas entre finas y medias presentando una granulometría más gruesa zona central (tómbolo de poniente) y en la zona de la San Bruno (Figura 2).

# 3 METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

En este capítulo se hará una descripción detallada de la metodología empleada tanto en el procesado de datos, como en la generación del modelo.

Por último, se describe el análisis de los resultados, que se ha llevado a cabo para conseguir el objetivo planteado con la suficiente y necesaria fiabilidad y precisión.

## 3.1 Clima marítimo

El estudio del clima marítimo y propagación del oleaje desde aguas profundas hasta la costa tiene por objeto conocer las condiciones de oleaje que alcanzan la zona de la playa.

Los resultados de este estudio son el punto de partida para la realización del estudio de Dinámica Litoral, ya que se precisará de los datos de oleaje, vientos y mareas asociados a la zona para la correcta propagación del oleaje desde aguas profundas hacia la playa de Isla Canela. Haciendo posible así una vez obtenida la propagación el cálculo de la tasa de erosión de la costa y por tanto del estado morfodinámico de la misma.

### 3.1.1 Datos de partida

Para la realización del estudio se han considerado los datos de clima marítimo (oleaje, viento, marea) pertenecientes a la base de datos meteorológicos y oceanográficos de Puertos del Estado, tanto para generar y propagar el oleaje mediante el modelo numérico, así como para la calibración de este y la simulación del nivel del mar debido a la influencia de las mareas.

Para ello se han utilizado dos tipos de registro de datos. Por un lado, los datos correspondientes puntos SIMAR para el oleaje y por otro los datos del punto REDMAR para la marea.

- Punto SIMAR 5026019
- Punto SIMAR 1051048
- Estación REDMAR 3329

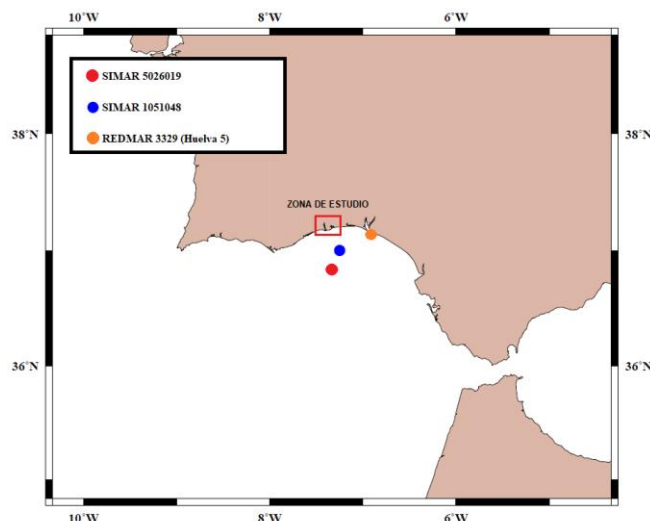


Figura 28 Situación general puntos SIMAR y REDMAR empleados (Puertos del Estado, 2019)

En cuanto a los puntos SIMAR, el primero de ellos que se encuentra a mayor distancia de la costa, se ha tomado como punto de partida para la generación del modelo y la selección de temporales dado que la serie temporal registrada es mayor y por tanto permite un análisis más amplio.

Por el contrario, el segundo se ha utilizado única y exclusivamente para la calibración del modelo con el fin de obtener unos valores de propagación de oleaje lo más fieles posibles a la realidad.

Por otro lado, dado la importancia de las variaciones del nivel del mar en la zona de estudio, se ha hecho un análisis a través del mareógrafo Huelva 5 (REDMAR 3329), obteniéndose el nivel del mar en cada uno de los estados simulados en este trabajo.

Dado que en la costa de Huelva (puerto de Huelva) podemos encontrar tres mareógrafos, se ha optado por tomar el que se encuentra en la zona exterior del puerto, como se muestra en la Figura 29.



Figura 29 Localización mareógrafo Huelva 5 (Puertos del Estado, 2019)

Para una mayor información acerca del funcionamiento de los puntos SIMAR de la Red de Puertos del Estado véase el Apéndice A: Red de puertos del Estado.

### 3.1.2 Descripción general en aguas profundas

Se desarrolla un análisis y una representación de la serie temporal completa que se obtiene a partir del punto SIMAR, así como del REDMAR exponiendo todos los valores con los que se parte. El periodo temporal del que se tienen registros se muestra a continuación:

- SIMAR:	01 de Enero de 1958	al	26 de Mayo de 2015
- REDMAR	13 de Febrero de 2003	al	31 de Diciembre de 2008

A partir de dichos datos se han representado de forma gráfica los registros temporales de oleaje, viento y niveles del mar de las series temporales completas, obteniéndose los valores del SIMAR para los dos primeros y del REDMAR para las mareas.

Para el oleaje se han obtenido diagramas de dispersión en función de las tres variables más representativas del mismo (altura de ola significativa, periodo pico y dirección media). Para el viento las variables analizadas han sido las correspondientes a su velocidad y dirección media.

Por último, también se añaden los histogramas correspondientes a cada una de las variables, así como una compilación de todos los datos en dos rosas de oleaje y viento, lo cual permite conocer de una forma rápida e intuitiva cuáles son las alturas de ola, periodos, direcciones medias de procedencia, velocidades y direcciones de viento que predominan en la zona de estudio.



### 3.1.3 Régimen medio

Se analiza el régimen medio escalar, para todo el registro de datos del SIMAR. Posteriormente se consideran las direcciones de procedencia más frecuentes de oleaje y de viento y se analiza el régimen medio para dichas direcciones.

Para la selección de las direcciones predominantes se ha tomado el valor umbral del 10% analizándose todas aquellas que superen el dicho porcentaje.

El análisis del régimen medio incluye:

- Ajuste de los datos a una función de densidad de probabilidad de Weibull.
- Ajuste de los datos a una función de distribución de Weibull.
- Ajuste de los datos a una función de distribución de Weibull en papel probabilístico normal.

Con dichas funciones se pretende conocer la densidad de probabilidad de las alturas de ola, así como su probabilidad de no excedencia.

### 3.1.4 Régimen extremal

Un régimen extremal de oleaje es un modelo estadístico que describe la probabilidad con la que se puede presentar un temporal.

Se entiende por temporal aquella situación durante la cual la altura de ola significativa supera un cierto umbral, valor que en este caso se ha fijado en 3,30 m, correspondiendo con el valor que se da en menos de un 1% del tiempo de la serie temporal que se tiene registro.

De igual modo las tormentas que se seleccionan para la simulación y análisis del modelo serán aquellas que además de superar dicho valor umbral, hayan pasado un mínimo de 36 horas entre una y otra de modo que se consideren tormentas independientes desde un punto de vista estadístico.

Para la serie temporal del SIMAR se obtienen un total de 223 tormentas, de las cuales se tomarán aquellas que superen el año 1977 ya que es a partir de ese año a partir del cual se desarrolla el análisis objeto de este trabajo.

Por tanto, se obtienen un total de 132 tormentas comprendidas entre 1977 y 2015.

## 3.2 Escenario de simulación

Se plantean dos escenarios de simulación basado en los valores obtenidos a partir del régimen extremal del SIMAR. La división del registro temporal en dos escenarios viene fundamentada por el posterior análisis de los resultados, ya que se compararán los valores obtenidos con los facilitados a través de los datos de REDIAM (Junta de Andalucía, 2010).

Dentro del catálogo se presta el servicio .kmz de la cartografía de tasas de erosión costera que caracterizan la costa andaluza desde el punto de vista de su vulnerabilidad, incluyéndose las tasas de erosión de toda la costa andaluza en el periodo 1977-2009 en puntos analizados cada 50 m de costa.

Dado que la serie temporal que utiliza la Junta de Andalucía está basada en datos entre 1977 y 2009 y para el desarrollo del presente trabajo se cuenta con una serie temporal comprendida entre 1958 y 2015, se plantean los siguientes escenarios.

- Escenario 1 (REDIAM)                      1977 – 2009
- Escenario 2                                      2009 – 2015

No se tomarán los datos anteriores a la fecha de 1977 debido a que es a partir de esa fecha cuando encontramos la costa tal y como está hoy. Con anterioridad a esa fecha, como se introdujo en los primeros apartados del presente trabajo, no existían los espigones que existen hoy en día y por tanto carece de sentido estudiar un oleaje antiguo con una batimetría y condiciones de contorno actuales.

Con estos dos escenarios se pretende comprobar y comparar los resultados obtenidos con los de REDIAM, así como un análisis de los resultados hasta 2015 observando las posibles variaciones o estabilidad de la costa en esos años.

### 3.3 Modelo numérico de propagación

El software que se toma como herramienta para la propagación del oleaje es el Delf3D, desarrollado por Deltares, con su modulo WAVE (Lesser, Roelvink, Van Kester, & Stelling, 2004).

Dicho modelo permite la simulación de los procesos que se dan desde aguas profundas (profundidad indefinida) hasta la costa. El software está basado en el modelo SWAN (Simulation Waves Nearshore), usado a nivel internacional en proyectos de ingeniería de costas y mediante el cual se obtienen características del oleaje tanto en aguas intermedias como en aguas someras, implementando dentro del modelo de cálculo, las variaciones del nivel del mar producidas debido a la rotura del oleaje (set-up).

Los procesos capaces de simular el módulo WAVE son los siguientes:

- Refracción y shoaling del oleaje a través de propagación sobre batimetría variable.
- Fenómenos de difracción del oleaje.
- Transmisión, bloqueo o reflexión del oleaje ante posibles obstáculos.
- Generación del oleaje debido a la interacción del viento en la superficie.
- Interacciones de carácter no lineal entre ondas (ola – ola) o entre ondas y corrientes.
- Disipación de energía debido a la rotura del oleaje por descrestamiento y profundidad
- Disipación de energía debido a la fricción del fondo marino a través de tres formulaciones distintas.

Para describir el oleaje, el modelo utiliza el espectro de densidad bidimensional de modo que a pesar de que pudiesen predominar en ciertos casos los fenómenos lineales, permite predecir con razonable exactitud los fenómenos de segundo orden.

Para una mayor información sobre las ecuaciones del modelo véase el Apéndice B: Ecuaciones del modelo.

#### 3.3.5 Calibración del modelo

De cara a conocer la fiabilidad de los resultados el modelo generado ha de ser calibrado antes de comenzar con las simulaciones y obtener resultados.

Para ello se toman los datos de altura de ola, periodo pico y direcciones medias correspondientes al SIMAR 1051048 y se desarrollan simulaciones que tomen parámetros de oleaje correspondientes a rangos temporales aleatorios en el SIMAR 5026019 propagando el oleaje hasta el punto de calibración.

Una vez la simulación se ha efectuado se utilizan los valores que se definen a continuación como indicadores del ajuste para la altura de ola, periodos y direcciones del oleaje (Olabarrieta, Warner, & Kumar, 2011).

- Error cuadrático medio (RMSE): Es una forma de evaluar la diferencia entre el valor que se obtiene a raíz de la simulación numérica y el valor real de la cantidad que se quiere calcular. El RMSE mide el promedio del cuadrado del error, siendo el error el valor en la que el estimador difiere de la cantidad a ser estimada. En el modelado estadístico, el RMSE es usado para determinar la medida en la que el modelo no se ajusta a la información, proporcionando de alguna forma la información necesaria para elegir la mejor simulación. De este modo, un RMSE mínimo a menudo, pero no siempre, indica una variación mínima, y por lo tanto indica un buen ajuste del modelo. Tomando  $M_n$  y  $S_n$  como los valores medidos (valores reales del SIMAR en el punto de calibración) y los valores obtenidos a partir del modelo respectivamente, el error se calcula según (3 – 1).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N (M_n - S_n)^2} \quad (3 - 1)$$

- Coeficiente de correlación (R): Es un parámetro capaz de establecer la dependencia y la tendencia de las dos variables de modo que analiza si la forma que producen ambas series de datos tiene o no similitud. Es decir, refleja si la gráfica de altura de ola procedente de la simulación sigue la tendencia de la gráfica de altura de ola medida con el instrumento, de modo que ambas ascienden y descienden en los mismos puntos. Tomando  $M_n$  y  $S_n$ , al igual que para RMSE, el valor de R se calcula según (3 – 2).

$$R = \frac{\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N (S_n - \bar{S}_n) \cdot (M_n - \bar{M}_n)}{\sigma_S \cdot \sigma_M} \quad (3 - 2)$$

- Parámetro de Skill (S): Este parámetro centra su valor del error en los picos de la gráfica y refleja si los valores picos de los datos simulados son capaces de alcanzar los valores pico de los datos medidos. Si estos valores se alcanzan bien, el valor del coeficiente de Skill será bueno. El rango de este parámetro va de 0 (mal rendimiento) a 1 (buen rendimiento). Se calcula según (3 – 3).

$$S = \frac{\sum_{n=1}^N |M_n - S_n|^2}{\sum_{n=1}^N (|\bar{M}_n - S_n|^2 + |\bar{M}_n - M_n|^2)} \quad (3 - 3)$$

El parámetro que se utiliza como calibrador es el parámetro de Collins que evalúa la disipación espectral del oleaje debido a la fricción con el fondo.

Se considera que el ajuste es bueno cuando el valor del coeficiente de correlación esté entre 0,70 y 0,80, el error cuadrático es el mínimo y el parámetro de Skill se aproxima al máximo a la unidad. Una vez alcanzado un buen ajuste se varía el parámetro y se repiten las simulaciones para comprobar si mejoran respecto a las anteriores.

El procedimiento a seguir en el proceso de calibración se explica de forma gráfica según el diagrama de flujos de la Figura 30.

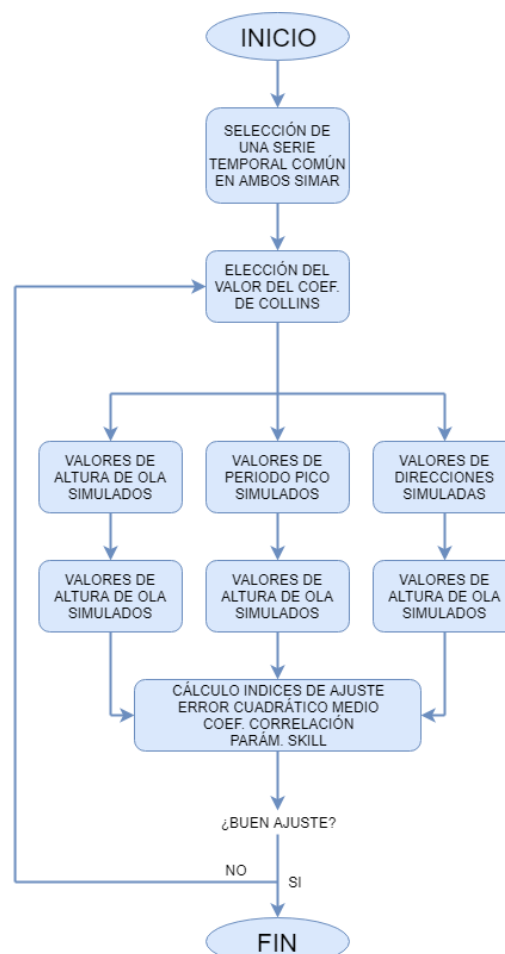


Figura 30 Diagrama de flujos de la calibración y ajuste del modelo

Se elige un periodo de tiempo para la simulación aleatorio, dentro del periodo de registros que se tiene en común para ambos SIMAR.

Posteriormente se va modificando el parámetro de Collins dejando los demás con su valor por defecto y se realiza la simulación obteniendo la altura de ola, el periodo pico y la dirección en el punto de control que tomamos como referencia para la calibración. Se comparan las tres variables empleando tres indicadores que se han descrito anteriormente (error cuadrático medio, coeficiente de correlación y parámetro de Skill).

Mientras la simulación vaya mejorando con respecto de la anterior se irá modificando el parámetro en dicha dirección.

Una vez se compruebe que los valores de los coeficientes están dentro de los límites aceptables y la modificación del parámetro de calibración no introduce nuevas mejoras se elige otro periodo distinto del anterior dónde se simulan de nuevo el oleaje sin modificar ningún parámetro.

Si el ajuste es bueno, el modelo se puede decir que está bien calibrado.

### 3.4 Cálculo del transporte de sedimentos

El transporte de sedimentos influye en la forma en planta y en perfil que adquirirá finalmente la playa, siendo clave su estudio durante las tormentas ya que es en estos momentos cuando el oleaje tiene una mayor energía y por tanto produce un transporte de sedimentos mayor.

Los estudios morfodinámicos sobre transporte de sedimentos dan una mayor importancia al transporte longitudinal, que es aquel que se produce en dirección paralela a la línea de costa, asumiéndolo como el principal agente que modifica la morfología de la playa en planta.

De este modo, para conocer la forma final de la playa, así como si se encuentra en un estado general de sedimentación, erosión o equilibrio, hay que estudiar el transporte de sedimentos longitudinal en varios perfiles de la playa y sacar conclusiones sobre las diferencias de flujo existente en las zonas entre perfiles.

Para el cálculo de la capacidad de transporte se utilizan diferentes formulaciones, en su mayoría formulas empíricas, de las cuales en el presente trabajo se opta por utilizar la formulación del CERC (Coastal Engineering Research Center, 1984), implementando la misma a través de un código de MATLAB que permite desarrollar los cálculos con mayor celeridad.

La formulación de CERC es uno de los métodos más antiguos y relaciona la tasa potencial de transporte de sedimento con la cantidad de energía del oleaje que llega a la costa. Esta formulación es válida debido a incidencia oblicua del oleaje en playas de suficiente extensión en longitud. Presenta el inconveniente de que no aporta muy buenos resultados para playas encajadas.

Para la playa de Isla Canela, esta formulación es perfectamente válida ya que la incidencia del oleaje es oblicua y no se trata de una playa encajada.

Las hipótesis de partida que toma la formulación de cara a poder desarrollar el cálculo de la forma más sencilla posible sin perder precisión son las que se indican a continuación.

- Batimetría recta y paralela.
- Validez de la teoría lineal de oleaje hasta proximidades de rotura.
- Existe una capacidad ilimitada de arena.
- No existe disipación de energía hasta la rotura.
- El oleaje es el único agente climático marítimo actuante

La expresión del caudal neto de transporte longitudinal de sedimentos se expone a través de las ecuaciones (3 – 4), (3 – 5) y (3 – 6).

$$Q_L = C_q \cdot H_b^{5/2} \cdot \sin(2 \cdot \alpha_b) \quad (3 - 4)$$

$$C_q = \frac{\rho \cdot K \cdot \sqrt{g}}{16 \cdot \sqrt{\gamma_b} \cdot (\rho_s - \rho) \cdot (1 - p)} \quad (3 - 5)$$

$$K = 1,60 \cdot e^{-2,50 \cdot D_{50}} \quad (3 - 6)$$

Siendo:

- $Q_L$  Transporte longitudinal de sedimentos (m<sup>3</sup>/s)
- $K$
- $C_q$
- $H_b$  Altura de rotura del oleaje en el perfil (m).
- $\alpha_b$  Dirección del oleaje en el momento de la rotura.
- $\rho$  Densidad del agua (Kg/m<sup>3</sup>).
- $\rho_s$  Densidad del sedimento (Kg/m<sup>3</sup>).
- $p$  Porosidad del sedimento.
- $\gamma_b$  Parámetro de rotura del oleaje.
- $D_{50}$  Tamaño medio del sedimento (mm).
- $g$  Gravedad (m/s<sup>2</sup>).

### 3.5 Tasa de erosión o sedimentación

Calculada la capacidad de transporte según la fórmula del CERC para cada uno de los temporales en cada uno de los perfiles definidos a lo largo de la línea de costa, se pasa a calcular la diferencia de este transporte longitudinal entre dos perfiles consecutivos, ya que esa es la magnitud la cual indica si se produce o no un déficit o un exceso en el flujo longitudinal de sedimentos entre un perfil y otro.

Los perfiles que se han considerado para el cálculo se ordenan en dirección de Oeste a Este (Figura 31), definiéndose el caudal longitudinal de sedimentos positivo en la misma dirección.

Con este modo de referenciar, si se obtiene un caudal positivo es indicativo de que en esa zona existe un balance positivo de sedimentos, es decir, hay sedimentos que no están saliendo del dominio y por tanto se está almacenando en su interior. A este proceso le llamaremos sedimentación, mientras que, si el balance de sedimentos es negativo, implicará pérdida de sedimentos en el interior del dominio y por consiguiente la erosión de la playa.

Los criterios seguidos para la elección de los perfiles son los siguientes:

- Deben ser perpendiculares a la línea de costa.
- Todos los perfiles han de tener la misma longitud.
- La longitud mínima necesaria de cada perfil irá desde tierra seca hasta un punto con una profundidad mínima de 10,00 m.
- Separación equidistante entre ellos en la línea de costa.
- Deben adecuarse a la morfología de la costa intentando abarcar tómbolos, zona de erosión y demás elementos singulares de la costa.

Finalmente se trazan un total de ocho perfiles con una longitud de 4.000 m. cada uno, llegando de media hasta una profundidad comprendida entre 12 y 13 m de profundidad y separados entre sí 750 m (Figura 31).

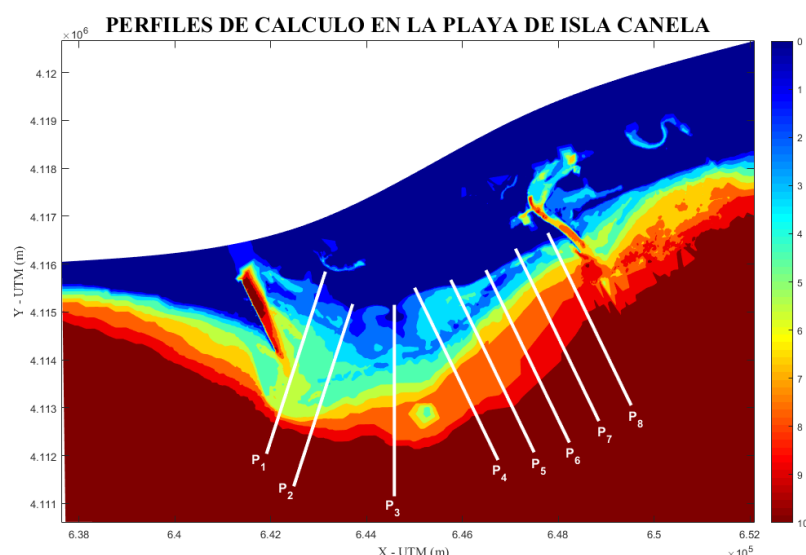


Figura 31 Perfiles de cálculo en la playa de Isla Canela

A continuación, en la Tabla 2 se muestran las coordenadas UTM de cada uno de los puntos de inicio y final de los ocho perfiles descritos.

PERFIL	PUNTO INICIAL (TIERRA)		PUNTO FINAL (AGUA)	
	X-UTM (m)	Y-UTM (m)	X-UTM (m)	Y-UTM (m)
1	643141,98	4115842,17	641911,43	4112036,16
2	643710,77	4115163,46	642480,21	4111357,45
3	644580,00	4115148,84	644580,00	4111149,09
4	645002,02	4115507,43	646743,89	4111906,61
5	645756,70	4115669,64	647498,56	4112068,82
6	646491,56	4115872,81	648233,43	4112271,99
7	647107,01	4116322,84	648848,87	4112722,02
8	647782,16	4116649,44	649524,03	4113048,62

Tabla 2 Coordenadas de los perfiles de cálculo

### 3.6 Análisis de los resultados

Obtenido los valores y la clasificación de las zonas entre perfiles según estén en proceso de erosión o sedimentación para cada uno de los escenarios que se proponen, se procede a un ajuste de los valores obtenidos convirtiendo la tasa de erosión de la costa en una función continua a lo largo de la misma más representativa de la realidad.

Para ello, se toman los valores discretos obtenidos del balance de sedimentos calculado en cada una de las zonas entre perfiles, y se ajustan mediante una función polinómica de grado 6 capaz de conseguir un ajuste admisible con unos valores de  $R^2$  lo más cercanos a la unidad posible.

Con ello se obtiene una clasificación de la zona de estudio en función de su estado de sedimentación o erosión.

Obtenida una clasificación de la costa para cada uno de los escenarios, se comprueba la relación que existe entre ellos, observándose si la tendencia del escenario 1 perdura durante el escenario 2.

Una vez comprobada la coherencia de los resultados, se desarrollará un segundo estudio comparativo entre los valores del escenario 1 y los ofrecidos a través del visor virtual de REDIAM (Junta de Andalucía, 2010), el cual ofrece las tasas de erosión de la costa de Andalucía obtenidas a partir del estudio de la evolución de la línea de costa a través de ortofotografías.





## 4 CLIMA MARÍTIMO

La morfología litoral de la costa occidental de Huelva está fuertemente influenciada por los agentes climáticos de la zona. En este capítulo se hará una descripción de los principales agentes, como son el oleaje, el viento y el nivel del mar a través de la influencia de las mareas.

### 4.1 Datos de partida

Los datos que se han tomado para el desarrollo del estudio son los referentes al SIMAR 5026019 (Figura 32).

A continuación, se ofrece una localización espacial del punto en cuestión, donde también se indica la posición del SIMAR 1051048, que se ha tomado como referencia para la calibración del modelo numérico.



Figura 32 Localización de los puntos SIMAR utilizados

Las coordenadas exactas de dichos puntos se muestran en la Tabla 3.

	SIMAR 5026019	SIMAR 1051048
<b>LATITUD</b>	36,833	37,000
<b>LONGITUD</b>	-7,833	-7,250
<b>PROFUNDIDAD</b>	Indefinida	Indefinida

Tabla 3 Coordenadas de los puntos SIMAR utilizados (Puertos del Estado, 2019)

En cuanto al nivel del mar, la información utilizada ha sido extraída de los datos registrados por el mareógrafo Huelva 5 (REDMAR 3329). El clavo geodésico más cercano es el SSPD, situado al norte de la bocana en el Puerto deportivo de Mazagón, junto al mareógrafo. El cero del mareógrafo coincide con el cero del puerto y está situado 4,517 m bajo SSPD y 1,747 bajo el Nivel Medio del Mar en Alicante. El cero hidrográfico está 4,407 m bajo el mismo clavo.

A continuación, se muestra en la Figura 33 las distintas coordenadas altimétricas de referencia del mareógrafo utilizado, y la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** la localización de éste.

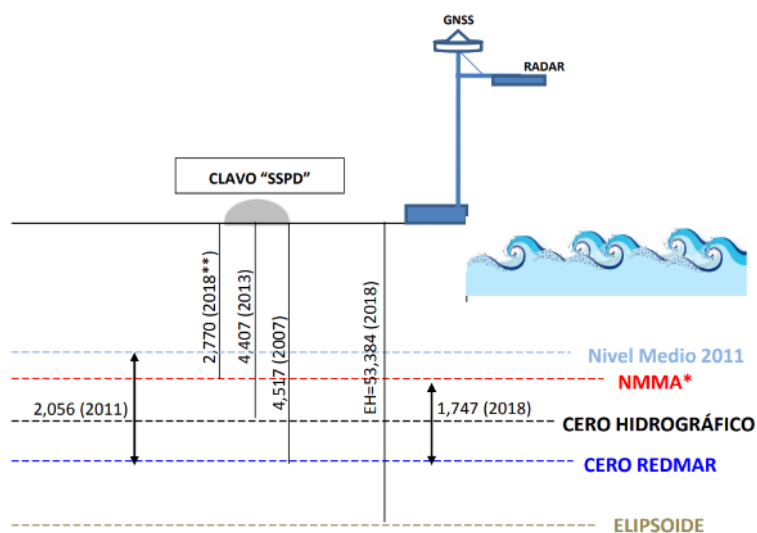


Figura 33 Niveles de referencia altimétrica del mareógrafo Huelva 5 (Puertos del Estado, 2019)

## 4.2 Oleaje

### 4.2.1 Descripción general del oleaje en aguas profundas

Primero de todo, se pasa a hacer una descripción general del oleaje registrado en aguas profundas a través de los siguientes gráficos.

- Gráfico de la serie temporal completa registrada desde 1958 a 2015.
- Gráficos de dispersión que pondrán en relación las siguientes variables.
  - Altura de ola significativa.
  - Dirección predominante.
  - Periodo pico.
- Rosa de oleaje en el punto analizado.
- Tablas con fundamento numérico de los gráficos expuestos.
- Histogramas de las siguientes variables.
  - Altura de ola significativa.
  - Dirección predominante.
  - Periodo pico.

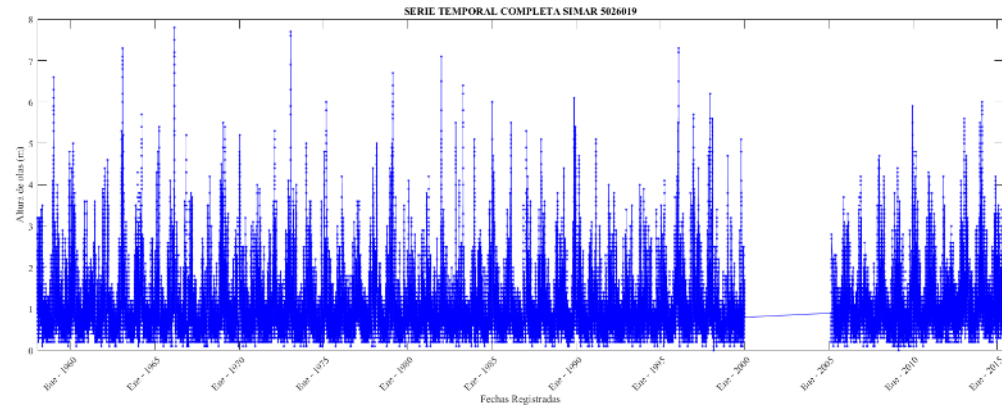


Figura 34 Serie temporal completa altura de ola significativa SIMAR 5026019

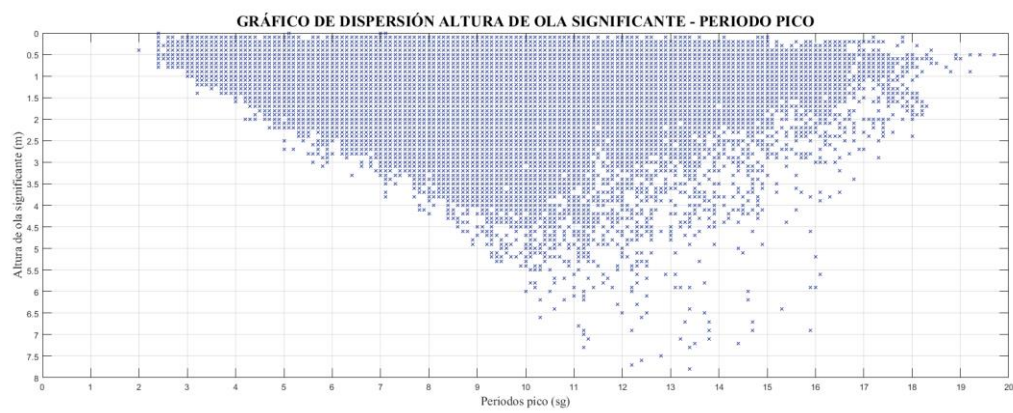


Figura 35 Gráfica de dispersión Hs frente a Tp SIMAR 5026019

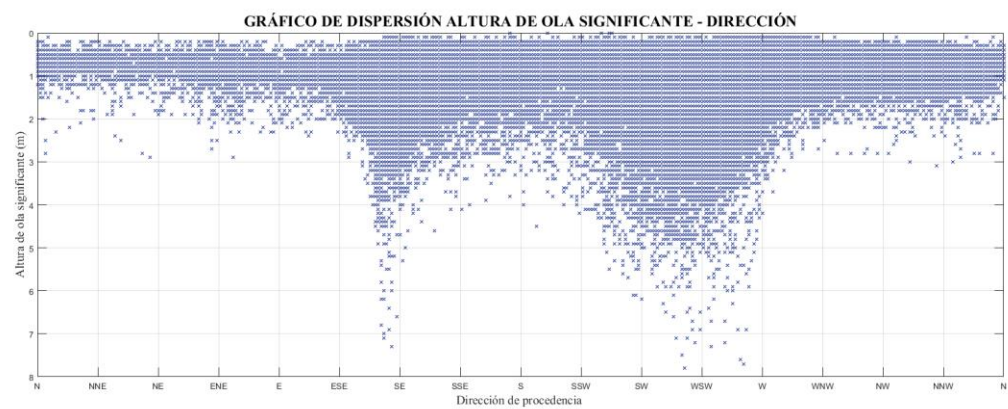


Figura 36 Gráfica de dispersión Hs frente a dirección media SIMAR 5026019

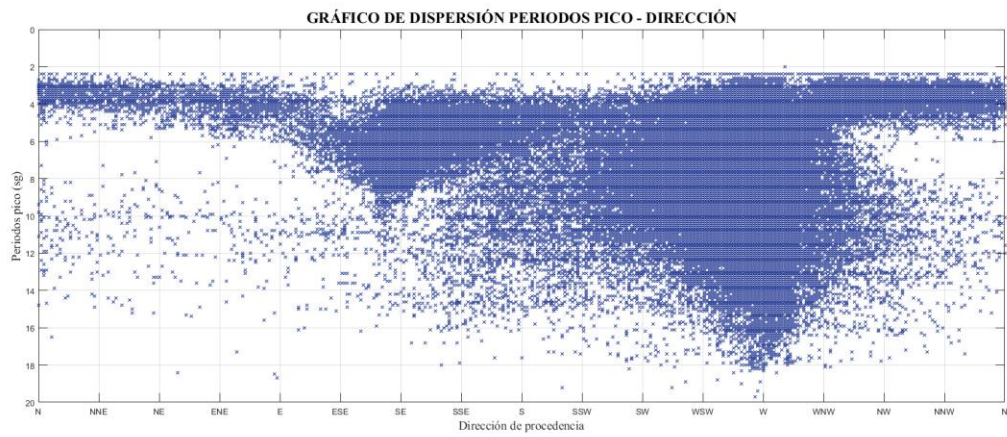


Figura 37 Gráfica de dispersión  $T_p$  frente a dirección media SIMAR 5026019

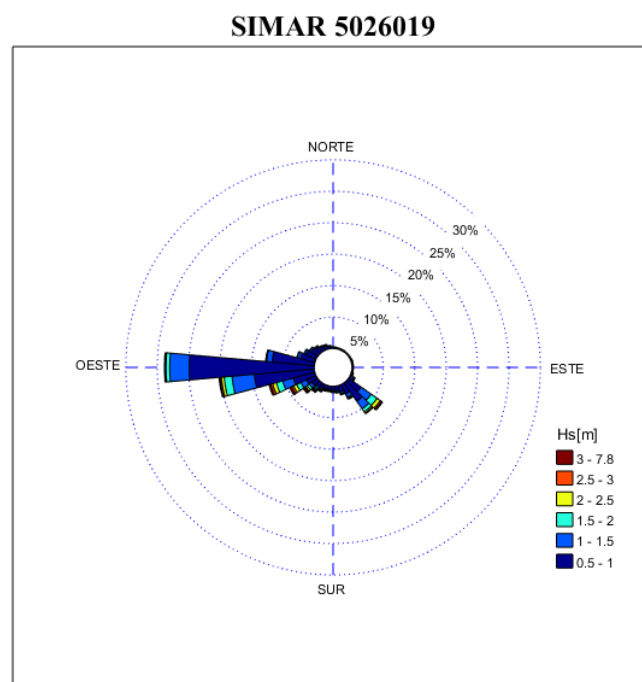


Figura 38 Rosa de oleaje SIMAR 5026019

Hs (m)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	Tp (sg)																			
0,25	0,00	0,00	0,08	0,51	0,61	0,15	0,32	0,42	0,43	0,38	0,23	0,12	0,08	0,06	0,03	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00
0,50	0,00	0,00	0,33	1,54	5,36	1,22	1,10	1,39	1,45	1,43	0,92	0,54	0,35	0,22	0,10	0,05	0,03	0,00	0,00	0,00
0,75	0,00	0,00	0,41	5,31	5,65	5,09	2,06	1,89	1,98	2,09	1,93	1,24	0,87	0,52	0,27	0,14	0,09	0,03	0,01	0,00
1,00	0,00	0,00	0,01	1,62	2,91	3,09	2,01	1,12	1,05	1,14	1,09	1,00	0,74	0,50	0,23	0,10	0,04	0,03	0,00	0,00
1,25	0,00	0,00	0,00	0,32	2,23	2,31	2,64	1,28	0,89	0,95	0,92	0,86	0,70	0,48	0,26	0,11	0,06	0,02	0,00	0,00
1,50	0,00	0,00	0,00	0,02	0,47	0,80	1,16	0,85	0,42	0,32	0,27	0,30	0,25	0,22	0,12	0,06	0,03	0,01	0,00	0,00
1,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	0,67	1,17	1,20	0,55	0,35	0,35	0,29	0,23	0,18	0,10	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00
2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,18	0,47	0,66	0,31	0,21	0,14	0,11	0,10	0,07	0,04	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00
2,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,12	0,39	0,75	0,48	0,32	0,17	0,09	0,10	0,08	0,04	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
2,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,12	0,33	0,27	0,12	0,08	0,05	0,06	0,03	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
2,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,09	0,32	0,30	0,17	0,11	0,08	0,06	0,04	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,13	0,14	0,10	0,07	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
3,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,18	0,12	0,10	0,05	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,07	0,06	0,05	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,06	0,06	0,06	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,83	9,32	17,51	13,67	11,55	10,47	8,63	7,94	6,64	4,92	3,67	2,50	1,28	0,55	0,34	0,13	0,03	0,00

Tabla 4 Dispersión de los valores de Hs frente a Tp

Hs (m)	NNW	NW	WNW	W	WSW	SW	SSW	S	SSE	SE	ESE	E	ENE	NE	NNE	N
								Dirección								
0,25	0,01	0,02	0,21	2,28	0,33	0,12	0,09	0,08	0,14	0,13	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01
0,50	0,12	0,32	1,01	9,52	1,54	0,59	0,41	0,44	0,76	1,06	0,03	0,03	0,05	0,03	0,04	0,07
0,75	0,72	1,52	2,60	14,09	3,01	0,90	0,58	0,63	1,22	3,04	0,18	0,16	0,16	0,17	0,24	0,35
1,00	0,43	0,84	1,49	7,06	2,06	0,61	0,29	0,30	0,63	2,07	0,23	0,14	0,13	0,10	0,11	0,18
1,25	0,34	0,46	0,83	4,95	2,34	0,66	0,34	0,33	0,60	2,46	0,28	0,12	0,11	0,06	0,05	0,11
1,50	0,09	0,11	0,20	1,45	1,17	0,33	0,14	0,15	0,24	1,14	0,11	0,03	0,03	0,02	0,01	0,03
1,75	0,06	0,08	0,13	1,18	1,44	0,53	0,16	0,13	0,24	1,25	0,12	0,02	0,03	0,01	0,00	0,02
2,00	0,02	0,02	0,03	0,37	0,71	0,28	0,10	0,05	0,13	0,60	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
2,25	0,01	0,01	0,03	0,35	0,85	0,34	0,11	0,08	0,10	0,62	0,05	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01
2,50	0,00	0,00	0,00	0,12	0,41	0,16	0,04	0,02	0,04	0,28	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,75	0,00	0,00	0,00	0,13	0,47	0,22	0,06	0,03	0,04	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,24	0,13	0,02	0,01	0,03	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3,25	0,00	0,00	0,00	0,04	0,25	0,17	0,03	0,01	0,01	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3,50	0,00	0,00	0,00	0,02	0,10	0,07	0,01	0,00	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3,75	0,00	0,00	0,00	0,02	0,11	0,08	0,02	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,06	0,04	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,25	0,00	0,00	0,00	0,01	0,05	0,06	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,50	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
6,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	1,80	3,38	6,53	41,66	15,26	5,39	2,42	2,26	4,19	13,22	1,07	0,52	0,54	0,40	0,47	0,79

Tabla 5 Dispersión de los valores de Hs frente a Dirección media de oleaje

Hs (m)	NNW	NW	WNW	W	WSW	SW	SSW	S	SSE	SE	ESE	E	ENE	NE	NNE	N
	Dirección															
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,09	0,14	0,14	0,22	0,04	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,06
3	0,95	2,02	1,22	2,44	0,73	0,15	0,09	0,09	0,14	0,13	0,04	0,15	0,21	0,21	0,30	0,43
4	0,56	0,54	1,35	8,64	1,66	0,46	0,41	0,51	1,06	1,46	0,11	0,21	0,21	0,11	0,07	0,19
5	0,04	0,05	0,83	4,20	1,30	0,51	0,30	0,46	1,43	4,03	0,34	0,08	0,06	0,01	0,01	0,02
6	0,00	0,02	0,38	2,65	1,90	0,64	0,26	0,26	0,76	4,35	0,31	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,04	0,40	3,42	2,28	0,90	0,25	0,16	0,31	2,50	0,16	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,02	0,08	0,47	3,81	2,18	0,88	0,29	0,18	0,10	0,56	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
9	0,03	0,13	0,44	4,21	1,79	0,71	0,25	0,17	0,08	0,09	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
10	0,03	0,09	0,34	3,79	1,32	0,50	0,20	0,16	0,09	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
11	0,03	0,11	0,33	2,92	0,83	0,30	0,14	0,10	0,07	0,03	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02
12	0,03	0,06	0,26	2,28	0,58	0,16	0,10	0,09	0,06	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,02
13	0,02	0,05	0,19	1,61	0,36	0,08	0,05	0,04	0,04	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
14	0,01	0,03	0,10	0,78	0,17	0,05	0,03	0,04	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,00	0,01	0,05	0,35	0,07	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	0,00	0,01	0,02	0,23	0,04	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	0,00	0,00	0,01	0,09	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	1,81	3,38	6,53	41,67	15,26	5,38	2,39	2,28	4,21	13,24	1,08	0,51	0,52	0,40	0,45	0,79

Tabla 6 Dispersión de los valores de Hs frente a Tp

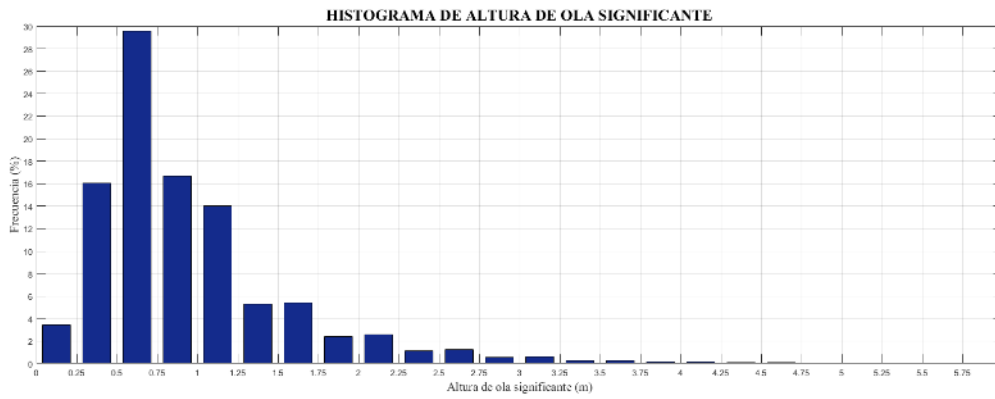


Figura 39 Histograma de altura de ola significativa SIMAR 5026019

Hs (m)	Fr (%)	Hs (m)	Fr (%)	Hs (m)	Fr (%)	Hs (m)	Fr (%)
< 0,25	3,44	1,50 - 1,75	5,41	3,00 - 3,25	0,62	4,50 - 4,75	0,08
0,25 - 0,50	16,02	1,75 - 2,00	2,39	3,25 - 3,50	0,23	4,75 - 5,00	0,04
0,50 - 0,75	29,59	2,00 - 2,25	2,58	3,50 - 3,75	0,27	5,00 - 5,25	0,03
0,75 - 1,00	16,67	2,25 - 2,50	1,10	3,75 - 4,00	0,13	5,25 - 5,50	0,02
1,00 - 1,25	14,04	2,50 - 2,75	1,22	4,00 - 4,25	0,14	5,50 - 5,75	0,02
1,25 - 1,50	5,28	2,75 - 3,00	0,58	4,25 - 4,50	0,08	> 6,00	0,02

Tabla 7 Frecuencias de altura de ola SIMAR 5026019



Figura 40 Histograma de dirección media del oleaje SIMAR 5026019

Dirección	Fr (%)	Dirección	Fr (%)	Dirección	Fr (%)	Dirección	Fr (%)
N	0,79	E	0,53	S	2,29	O	41,67
NNE	0,47	ESE	1,08	SSO	2,40	ONO	6,53
NE	0,40	SE	13,24	SO	5,39	NO	3,40
ENE	0,53	SSE	4,19	OSO	15,27	NNO	1,82

Tabla 8 Frecuencias de direcciones medias del oleaje SIMAR 5026019



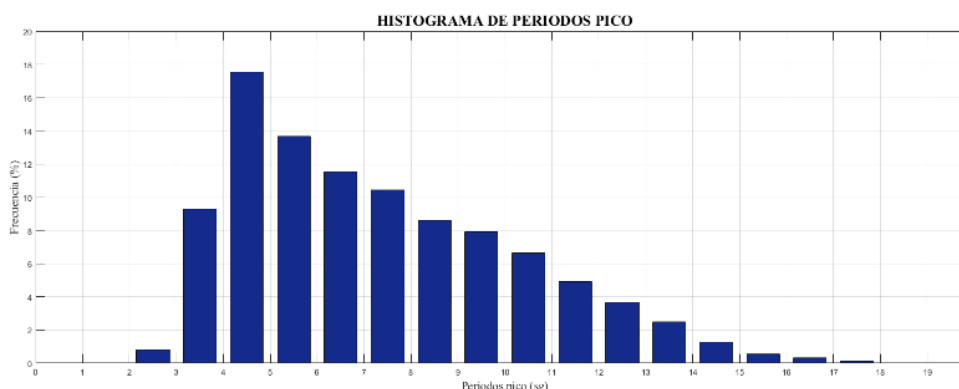


Figura 41 Histograma de periodos pico del oleaje SIMAR 5026019

Tp (sg)	Fr (%)	Tp (sg)	Fr (%)	Tp (sg)	Fr (%)	Tp (sg)	Fr (%)
1	0,00	6	13,67	11	6,65	16	0,56
2	0,00	7	11,55	12	4,92	17	0,33
3	0,83	8	10,46	13	3,68	18	0,14
4	9,31	9	8,62	14	2,49	19	0,03
5	17,54	10	7,94	15	1,29	20	0,00

Tabla 9 Frecuencias de periodos pico del oleaje SIMAR 5026019

#### 4.2.1.1 Análisis objetivo de los resultados

Como se ha podido comprobar desde la Figura 34 hasta la Figura 41 y desde la Tabla 4 hasta la Tabla 9, el oleaje de la zona tiene dos tendencias muy marcadas, en cuanto a su dirección se refiere, fácilmente diferenciables a través del histograma de direcciones.

Por un lado, sumando prácticamente el 70% se encuentran los oleajes procedentes de la zona Oeste. Por otro lado, están los oleajes del Sureste, los cuales también son significativos sumando casi un 20%. Se comprueba por tanto que las dos direcciones medias de procedencia más frecuentes, sumando en total prácticamente el 90% del oleaje de la zona, son los oleajes del Sureste y el Oeste.

De igual modo ambas direcciones son las que recogen las mayores alturas de ola registradas, como se puede comprobar en el gráfico de dispersión también expuesto (Figura 36).

En relación con las alturas de ola, se obtienen picos en los registros de hasta los 7,80 m de altura, aunque apenas el 0,01% de los registros son los que superan en cualquier caso los 6,00 m.

La altura de ola registrada con mayor frecuencia se encuentra en una horquilla que va desde los 0,50 m hasta los 0,75 m, llegando a sumar prácticamente el 30%. Aumentando el rango y poniendo el límite en 1,50 m de altura, se observa cómo el 85% del oleaje entraría entre esos valores.

Por último, tomando como variable de análisis los periodos pico analizados, a partir del histograma de frecuencias (Figura 41) se observa cómo el 90% se encuentra entre valores de 4 y 12 s.

Dentro de ese 90%, es digno de mencionar que se comprueba un pico para el valor de los 5 s, concentrando en dicho valor más del 17% de los registros siendo por tanto el valor más frecuente.

#### 4.2.2 Régimen medio anual de $H_s$ en aguas profundas

Teniendo en cuenta que todos los regímenes medios de alturas de ola se ajustan a funciones de distribución estadística de tipo Weibull, se ha obtenido la función de distribución del régimen medio anual en aguas profundas en el punto SIMAR analizado.

Las funciones Weibull de distribución tienen una formulación matemática según  $(4 - 1)$ .

$$y = f(x|a, b) = b \cdot a^{-b} \cdot x^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b} \cdot I_{(0, \infty)}(x) \quad (4 - 1)$$

Una vez que se ha obtenido el ajuste del régimen escalar de las alturas de ola en el punto SIMAR, se pasa a un análisis más en detalle de tres de las direcciones más predominantes en cuanto a probabilidad de altura de ola se refiere. De ese modo se analizan las direcciones O, OSO y SE.

A continuación, en la Tabla 10 se resumen los valores de los parámetros del ajuste para cada uno de los casos estudiados.

	<b>a</b>	<b>b</b>
<b>Escalar</b>	1,0412	1,5977
<b>Direccional O</b>	0,8124	1,7974
<b>Direccional OSO</b>	1,4044	1,6091
<b>Direccional SE</b>	1,2882	1,8457

*Tabla 10 Parámetros del ajuste Weibull para el régimen medio*

En los apartados que siguen se muestran los diferentes ajustes para cada uno de los casos de régimen medio estudiados. Se incluyen en cada caso tres figuras que son las siguientes:

- Función de densidad.
- Función de distribución.
- Ajuste Weibull.

La primera de ellas muestra a través de un histograma la probabilidad de ocurrencia de cada una de las alturas de ola que se muestra en el eje de abscisas, obtenido a partir de los datos tomados directamente del registro del punto SIMAR.

En segundo lugar, se muestra otro histograma que ajustado según la distribución Weibull mediante indica la probabilidad de no excedencia de las mismas alturas de ola.

Por último, se muestra la función de distribución, que indica la probabilidad de no excedencia, pero esta vez representada en papel probabilístico normal, escalando el eje de abscisas mediante escala logarítmica. De este modo se consigue que la distribución pase a convertirse en una recta.

#### 4.2.2.1 Régimen medio escalar

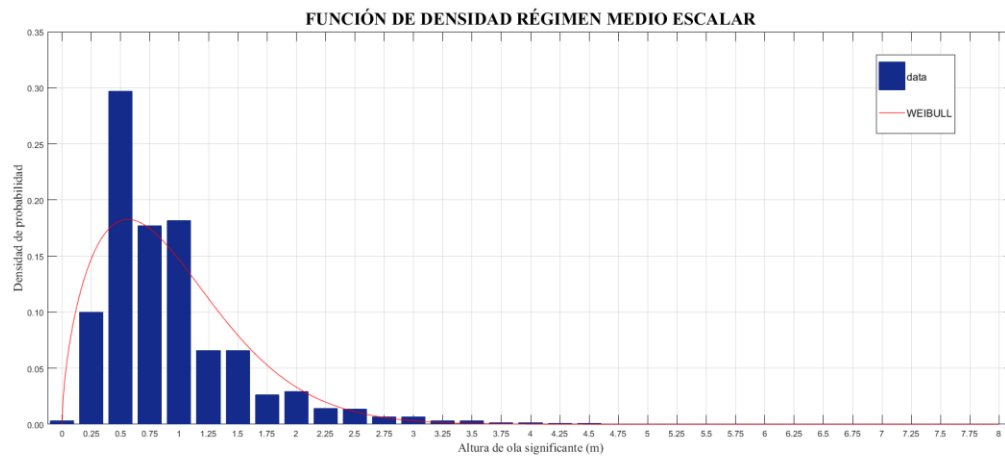


Figura 42 Función de densidad para el régimen medio escalar

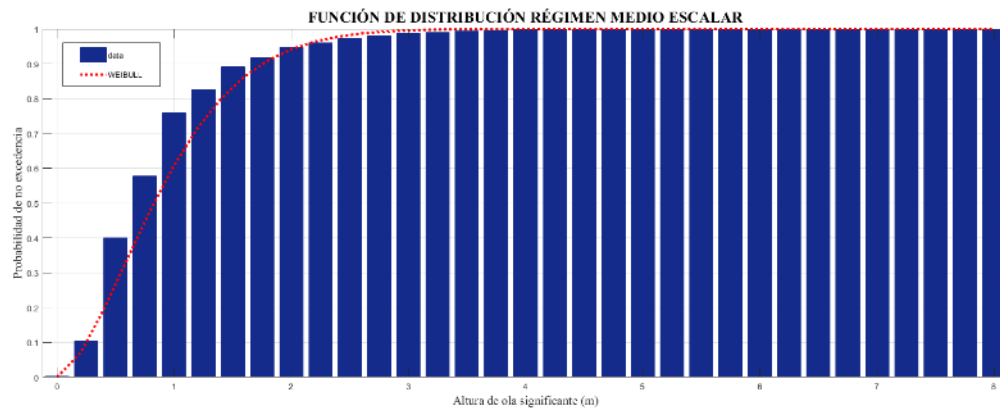


Figura 43 Función de distribución para el régimen medio escalar

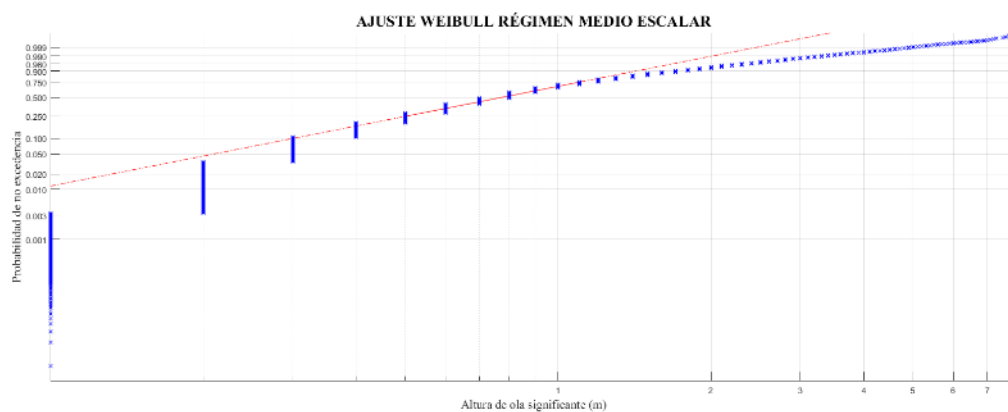


Figura 44 Ajuste función Weibull para el régimen medio escalar

#### 4.2.2.2 Régimen medio direccional O



Figura 45 Función de densidad para el régimen direccional O

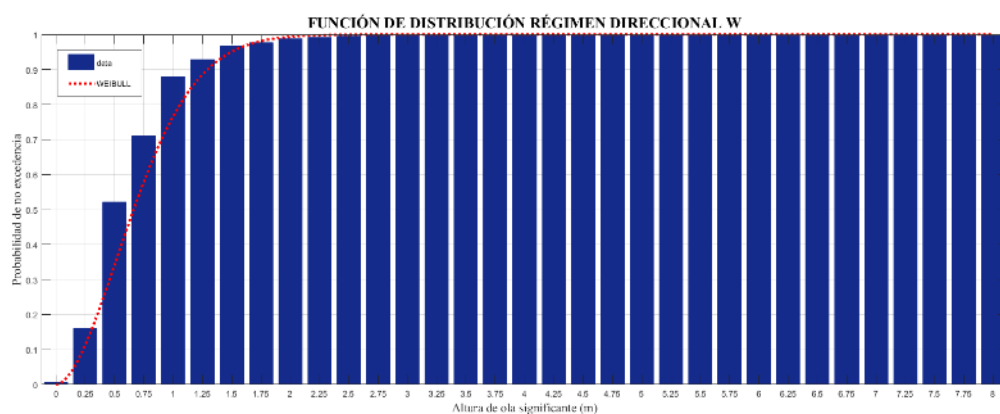


Figura 46 Función de distribución para el régimen direccional O

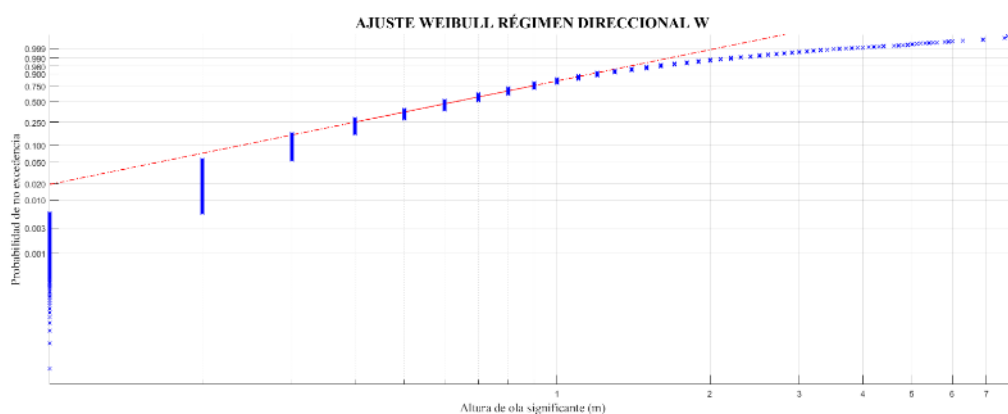


Figura 47 Ajuste función Weibull para el régimen direccional O

## 4.2.2.3 Régimen medio direccional OSO

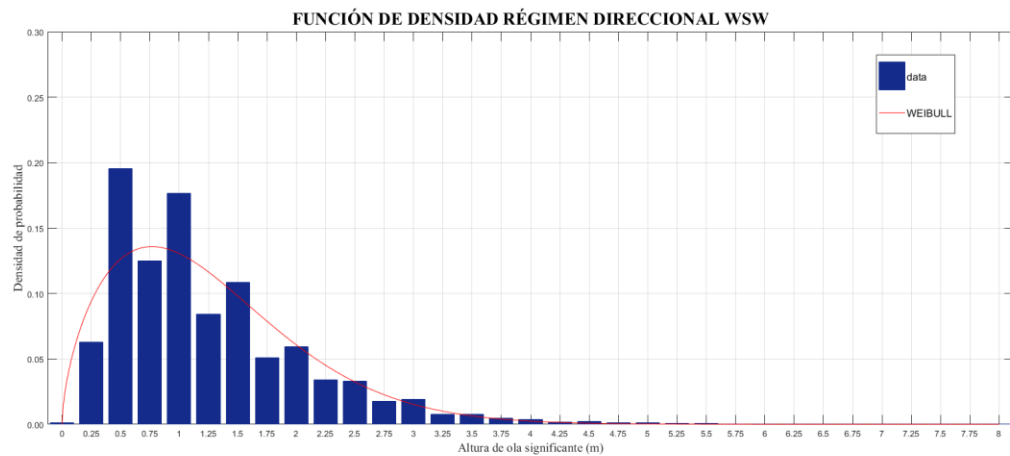


Figura 48 Función de densidad para el régimen direccional OSO

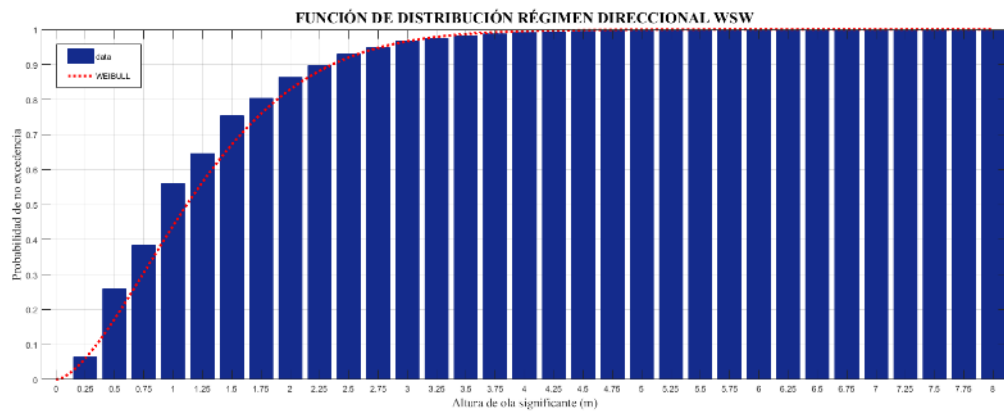


Figura 49 Función de distribución para el régimen direccional OSO

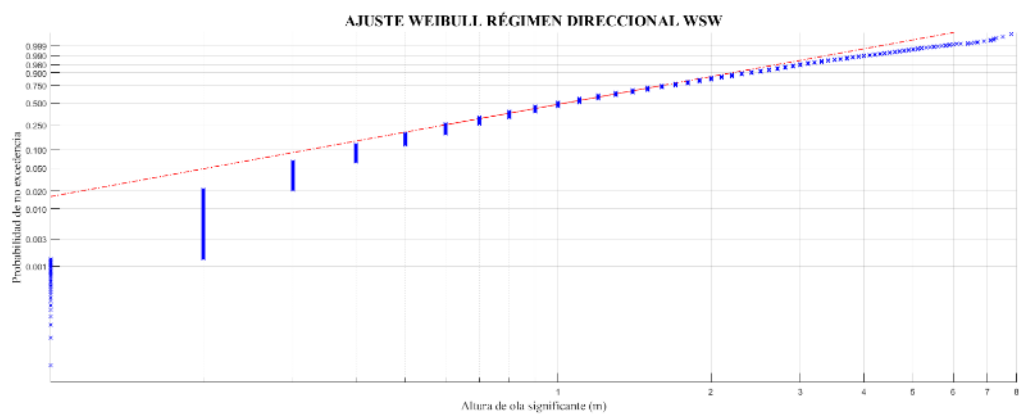


Figura 50 Ajuste función Weibull para el régimen direccional OSO

#### 4.2.2.4 Régimen medio direccional SE

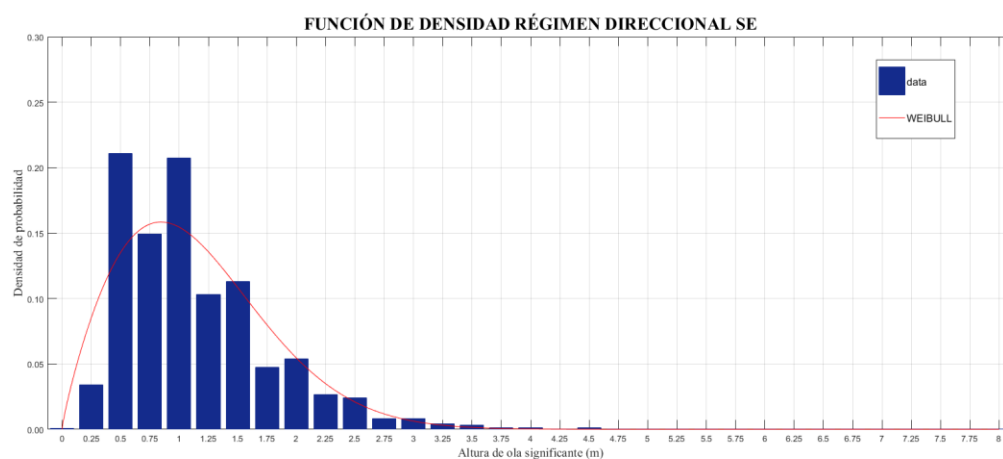


Figura 51 Función de densidad para el régimen direccional SE

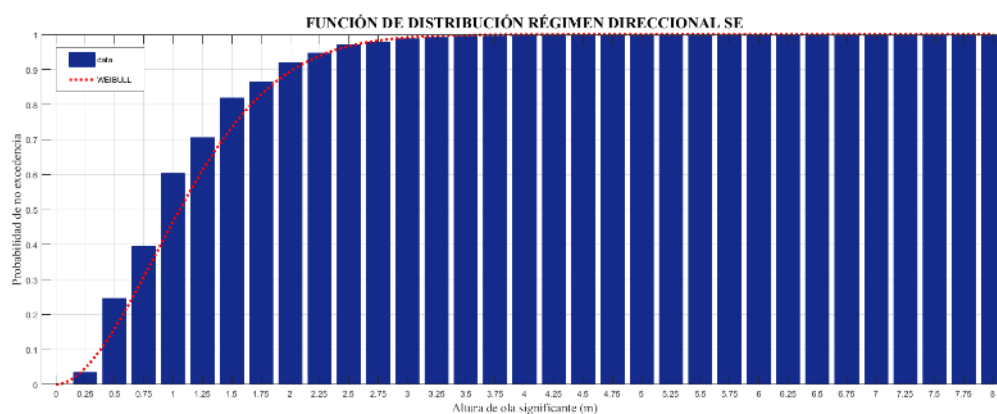


Figura 52 Función de distribución para el régimen direccional SE

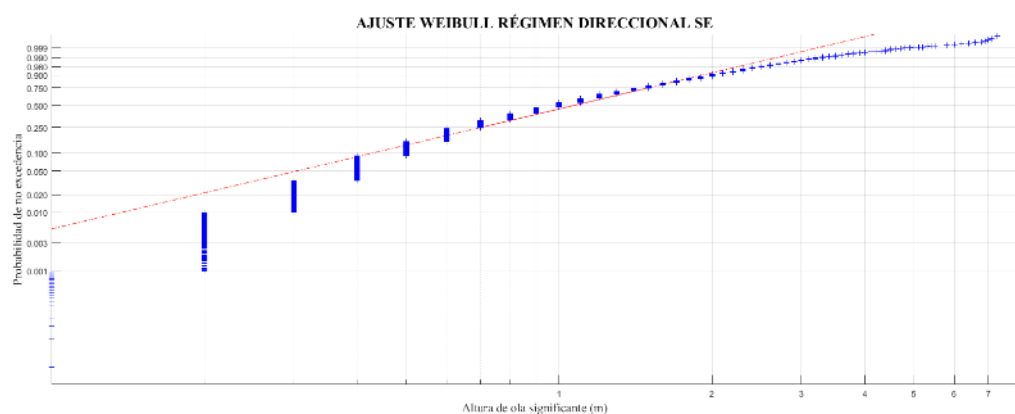


Figura 53 Ajuste función Weibull para el régimen direccional SE

#### 4.2.2.5 Análisis objetivo de los resultados

Como resumen de la caracterización del régimen medio de oleaje, así como los regímenes medios direccionales que se dan con mayor frecuencia, se muestra a continuación en la Tabla 11 un resumen de los datos obtenidos y con ella se obtiene una visión general del oleaje que se da en la zona de estudio.

	P. no excedencia 50 %	P. no excedencia 80 %
<b>Escalar</b>	0,80 m	1,55 m
<b>Direccional O</b>	0,70 m	1,15 m
<b>Direccional OSO</b>	1,10 m	2,10 m
<b>Direccional SE</b>	1,05 m	1,85 m

Tabla 11 Parámetros del ajuste Weibull para el régimen medio

Por tanto, se entiende que los mayores temporales que se producen en la zona son aquellos cuyo oleaje incide con componente OSO, superando con un amplio margen los valores de altura de ola registrados por el régimen escalar medio, así como por las otras dos direcciones analizadas.

#### 4.2.3 Régimen extremal anual de $H_s$ en aguas profundas

Para la obtención del régimen extremal en el punto SIMAR, el método que se emplea es el denominado POT (Peaks Over Threshold), en español “Picos Sobre el Umbral”.

Para ello lo que se toma como altura de ola umbral ha sido el valor de altura de ola superada en el 1% de los casos registrados por el punto SIMAR.

Con ello se hace un filtrado de los registros calculando aquellas olas que superan el umbral. Para garantizar la independencia de los temporales se impone la condición de que han de estar separados dichos picos un mínimo de 36 horas.

De este modo se han obtenido, para un valor fijado de altura de ola superada en el 1% de los casos de 3,30 m, un total de 227 temporales a lo largo de la serie de datos comprendidos entre 1958 y 2015 (57 años).

Dado que el presente trabajo se divide en dos escenarios temporales, el número de temporales que se han detectado en cada uno de los escenarios es el siguiente.

- Escenario 1            106 temporales.
- Escenario 2            26 temporales.

A continuación, en la Figura 54 se muestra un gráfico con los registros del SIMAR y los temporales marcados.

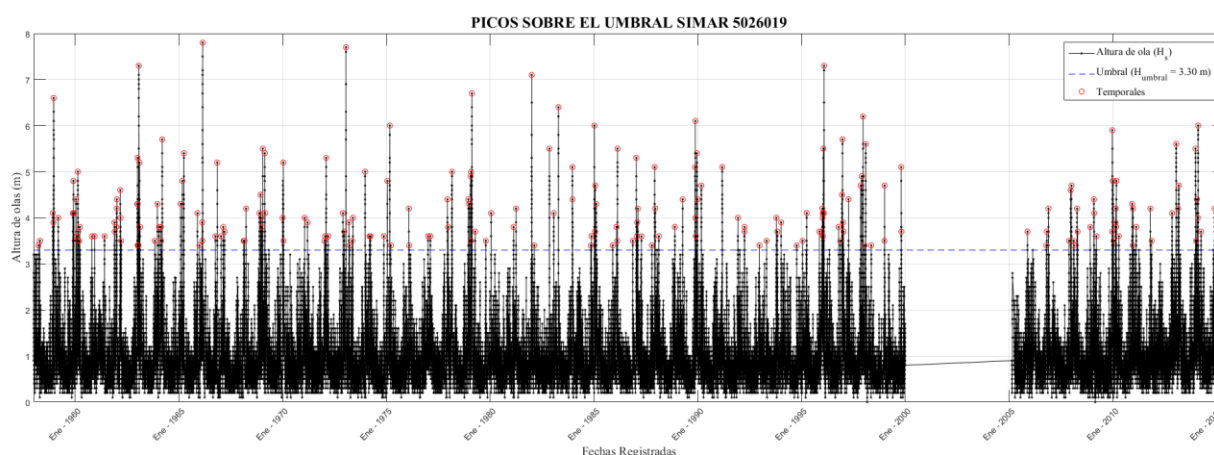


Figura 54 Temporales en los registros de altura de ola significativa

Nótese que como se observaba tanto en la Figura 34 así como en la Figura 54 se obtiene un vacío entre los años 2000 y 2005 en el cual no se tienen valores registrados por el SIMAR.

Dado el carácter extremal de la serie a analizar, se toma como distribución de frecuencias para el ajuste una distribución estadística de Gumbel Tipo I, ya que se conoce que los regímenes extremales se distribuyen como tal. La función de distribución sigue la siguiente ecuación (4 – 2).

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-u}{a}}} \quad (4 - 2)$$

A continuación, en la Tabla 12 se muestran los valores de los parámetros del ajuste para el régimen extremal del punto SIMAR estudiado.

	<b>u</b>	<b>a</b>
<b>Escalar</b>	3,6866	0,5532

Tabla 12 Parámetros del ajuste Gumbel para el régimen extremal

A continuación, se muestran el ajuste desarrollado en la Figura 55 y la Figura 56.

- Función de densidad.
- Función de distribución.

La primera de ellas muestra a través de un histograma la probabilidad de ocurrencia de cada una de las alturas de ola del régimen extremal que se muestra en el eje de abscisas, obtenido a partir de los datos tomados directamente del registro del punto SIMAR.

En segundo lugar, se muestra otro histograma que ajustado según la distribución Weibull mediante el cual se indica la probabilidad de no excedencia de las mismas alturas de ola.

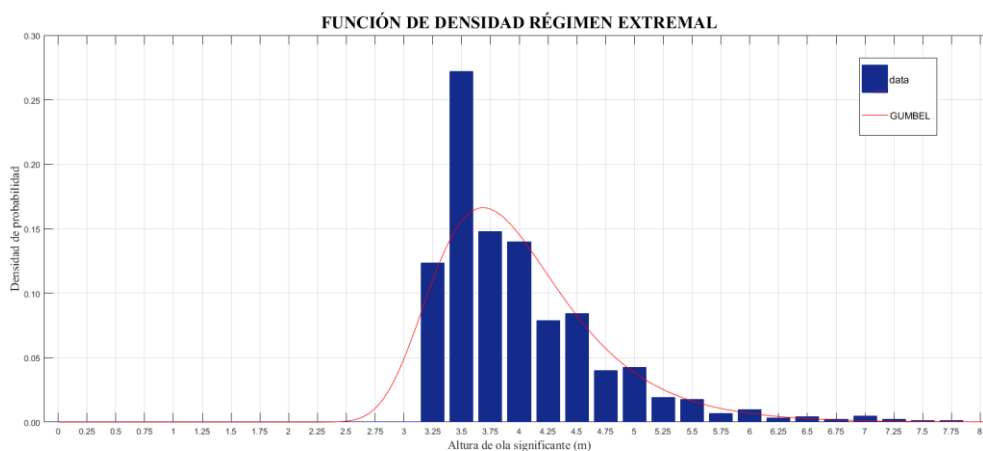


Figura 55 Función de densidad para el régimen extremal

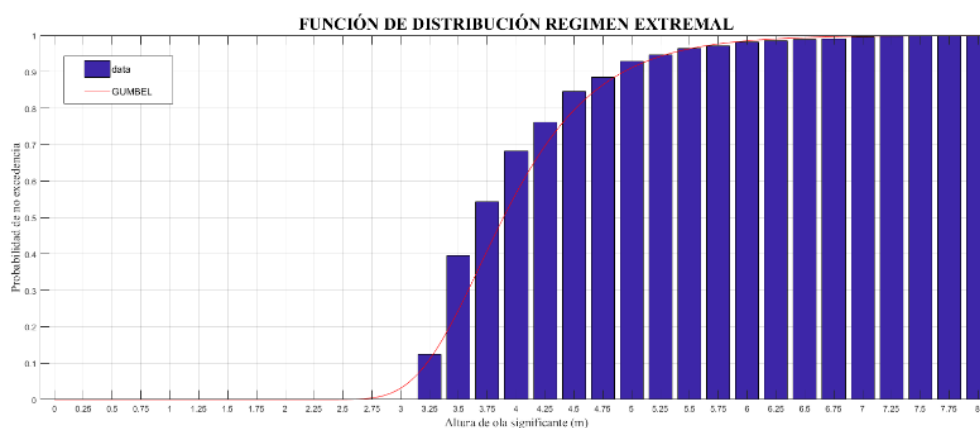


Figura 56 Función de distribución para el régimen direccional SE



#### 4.2.3.1 Análisis objetivo de los resultados

El rango de alturas de ola registrado en el régimen extremal comprende valores entre 3,30 m (marcados como umbral) y los 7,80 m, siendo las más frecuentes aquellas entre 3,50 y 3,75 m, produciéndose en el 27% de los casos. De este modo se obtiene una probabilidad de excedencia del 50% para valores de altura de ola de 4,00 m y del 75% para alturas de ola superiores a los 4,50 m.

### 4.3 Viento

#### 4.3.4 Descripción general del viento en aguas profundas

Primero de todo se pasa a hacer una descripción general del viento registrado por el punto SIMAR, al igual que se hizo para la caracterización del oleaje, a través de las siguientes gráficas:

- Gráficos de dispersión que pondrán en relación las siguientes variables.
  - Velocidad del viento.
  - Dirección predominante.
- Rosa de oleaje en el punto analizado.
- Tablas con fundamento numérico de los gráficos expuestos.
- Histogramas de las siguientes variables.
  - Velocidad del viento.
  - Dirección predominante.

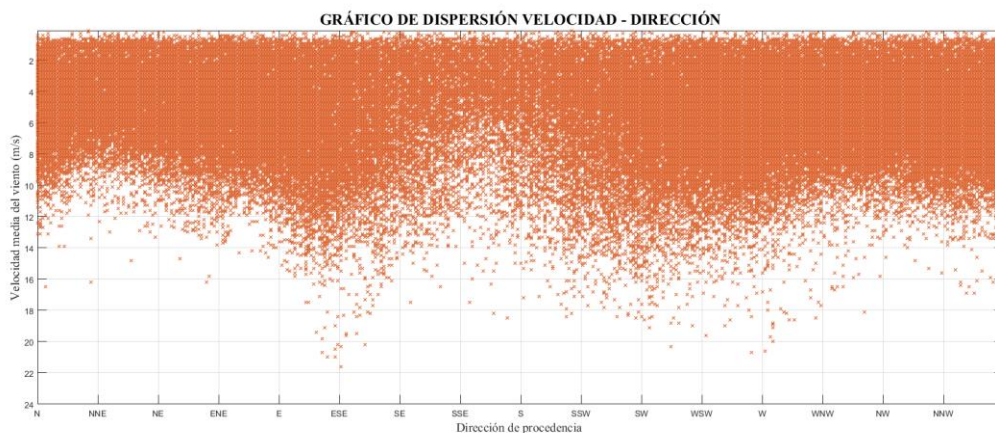


Figura 57 Gráfica de dispersión Vv frente a DirV SIMAR 5026019

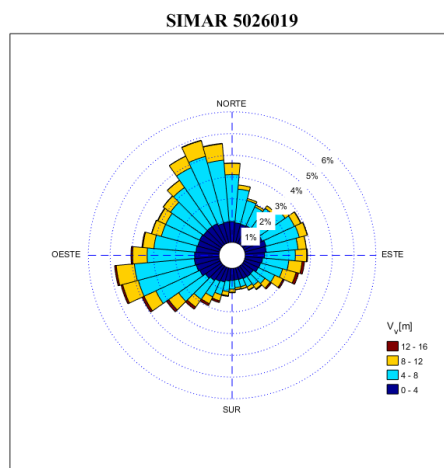


Figura 58 Rosa de vientos SIMAR 5026019

Vv (m)	NNW	NW	WNW	W	WSW	SW	SSW	S	Dirección								
									SSE	SE	ESE	E	ENE	NE	NNE	N	
0	0,10	0,11	0,10	0,11	0,09	0,10	0,10	0,08	0,08	0,11	0,09	0,11	0,12	0,11	0,11	0,11	1,63
1	0,40	0,42	0,44	0,45	0,45	0,40	0,37	0,36	0,36	0,37	0,42	0,47	0,50	0,50	0,45	0,44	6,80
2	0,65	0,70	0,70	0,79	0,70	0,64	0,47	0,42	0,42	0,47	0,56	0,68	0,67	0,71	0,66	0,67	9,91
3	0,94	1,09	1,07	1,22	1,13	0,83	0,54	0,41	0,36	0,44	0,58	0,77	0,87	0,81	0,76	0,93	12,75
4	1,52	1,47	1,24	1,52	1,45	0,96	0,50	0,35	0,30	0,43	0,57	0,86	0,96	0,86	0,84	1,21	15,04
5	1,88	1,36	1,07	1,53	1,61	0,85	0,38	0,24	0,21	0,35	0,56	0,88	0,96	0,82	0,78	1,52	15,00
6	1,82	1,03	0,85	1,27	1,48	0,66	0,30	0,18	0,18	0,29	0,58	0,79	0,87	0,73	0,54	1,34	12,91
7	1,43	0,81	0,70	0,96	1,10	0,45	0,26	0,16	0,14	0,26	0,50	0,66	0,69	0,49	0,30	1,05	9,96
8	0,90	0,49	0,52	0,69	0,71	0,42	0,21	0,11	0,09	0,23	0,44	0,49	0,40	0,22	0,15	0,67	6,74
9	0,37	0,26	0,25	0,44	0,44	0,31	0,16	0,09	0,07	0,17	0,36	0,32	0,22	0,12	0,04	0,33	3,95
10	0,18	0,12	0,12	0,26	0,24	0,24	0,16	0,08	0,05	0,11	0,26	0,21	0,10	0,04	0,02	0,12	2,31
11	0,08	0,06	0,06	0,16	0,16	0,16	0,10	0,05	0,04	0,08	0,18	0,12	0,05	0,03	0,01	0,05	1,39
12	0,02	0,02	0,03	0,08	0,09	0,11	0,08	0,02	0,01	0,05	0,10	0,06	0,03	0,01	0,00	0,02	0,73
13	0,01	0,01	0,02	0,03	0,05	0,07	0,05	0,02	0,01	0,04	0,07	0,03	0,01	0,00	0,00	0,01	0,43
14	0,00	0,00	0,00	0,02	0,03	0,05	0,03	0,01	0,00	0,02	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,21
15	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10
16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	10,30	7,95	7,17	9,54	9,76	6,31	3,74	2,58	2,32	3,43	5,32	6,48	6,45	5,45	4,66	8,47	

Tabla 13 Dispersión de los valores de Vv frente a direcciones medias del viento

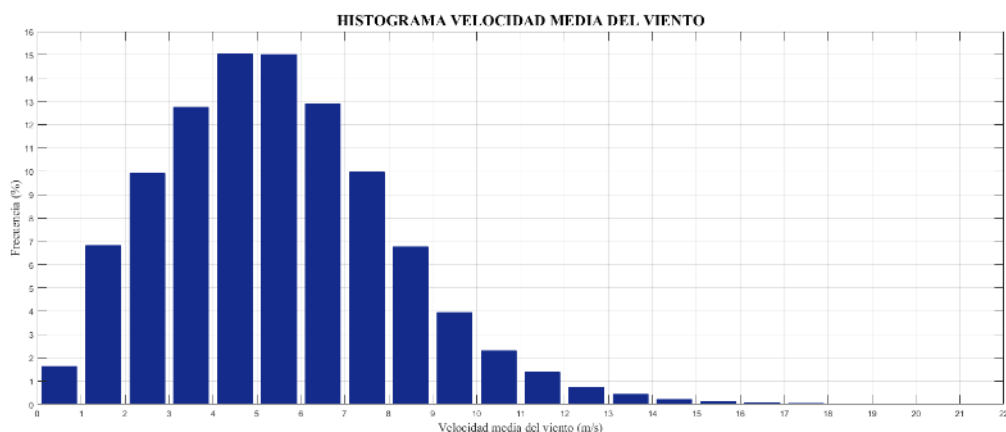


Figura 59 Histograma de velocidades medias del viento SIMAR 5026019

Vv (m/sg)	Fr (%)	Vv (m/sg)	Fr (%)	Vv (m/sg)	Fr (%)	Vv (m/sg)	Fr (%)
< 1,00	1,62	5,00 - 6,00	15,01	10,00 - 11,00	2,31	15,00 - 16,00	0,12
1,00 - 2,00	6,81	6,00 - 7,00	12,90	11,00 - 12,00	1,37	16,00 - 17,00	0,06
2,00 - 3,00	9,91	7,00 - 8,00	9,96	12,00 - 13,00	0,73	17,00 - 18,00	0,03
3,00 - 4,00	12,75	8,00 - 9,00	6,75	13,00 - 14,00	0,44	18,00 - 19,00	0,02
4,00 - 5,00	15,04	9,00 - 10,00	3,95	14,00 - 15,00	0,22	> 19,00	0,02

Tabla 14 Frecuencias de velocidades medias del viento SIMAR 5026019

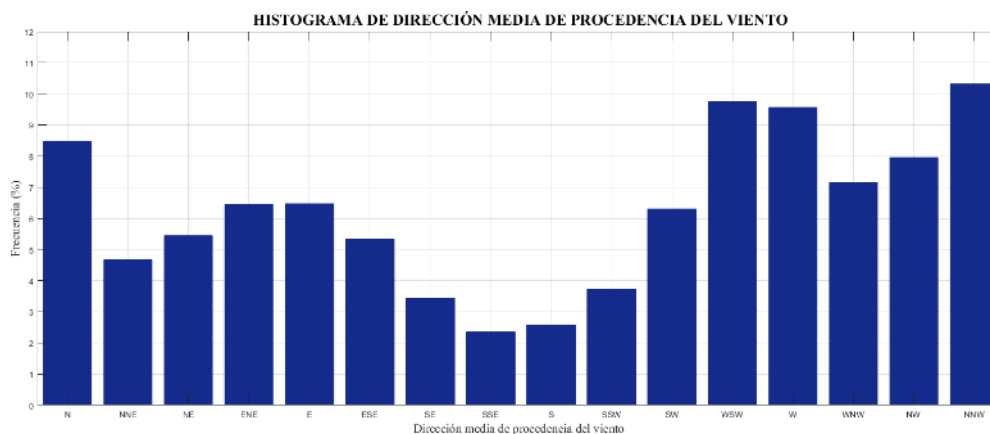


Figura 60 Histograma de direcciones medias del viento SIMAR 5026019

Dirección	Fr (%)	Dirección	Fr (%)	Dirección	Fr (%)	Dirección	Fr (%)
N	8,47	E	6,47	S	2,58	O	9,57
NNE	4,67	ESE	5,34	SSO	3,73	ONO	7,16
NE	5,45	SE	3,43	SO	6,31	NO	7,95
ENE	6,46	SSE	2,35	OSO	9,76	NNO	10,31

Tabla 15 Frecuencias de direcciones medias del viento SIMAR 5026019

#### 4.3.4.1 Análisis objetivo de los resultados

Como se ha podido comprobar desde la Figura 57 hasta la Figura 60 y desde la Tabla 13 hasta la Tabla 15, el viento medio no describe una dirección predominante que destaque frente al resto como si pasaba con el oleaje. A pesar de todo sí que se observan frecuencias algo superiores de la zona del Norte y el Oeste.

Esto se debe a que, en la zona del golfo de Cádiz, en concreto en la zona del litoral occidental onubense, el viento que predomina es un viento de poniente (O – SO) durante la tarde (entre las 14:00 y 23:00 aproximadamente) que pasa a cambiar a Norte por la noche. Alternándose con periodos de levante, que debido al “efecto embudo” que genera el estrecho de Gibraltar no son capaces de desarrollar grandes velocidades.

De este modo se observa que la dirección que se registra con mayor frecuencia es la proveniente de la zona NNO con una frecuencia de 10,31%. Contabilizando las frecuencias registradas entre direcciones N y SO, podemos comprobar como ahí sí que notamos unos registros con una notable frecuencia de ocurrencia ascendiendo hasta casi el 60%.

En cuanto a velocidades, no se aprecia que se asocien direcciones a velocidades concretas, encontrándose una franja general hasta aproximadamente los 12 – 13 m/s que se dan en cualquier dirección. Se pueden intuir de forma suave dos picos correspondientes a los vientos de ESE y los de SO – ONO que llegan a registrar vientos de hasta los 22 m/s.

En el cómputo general, como se muestra en el histograma de velocidades (Figura 59), sí que se observa una clara tendencia sumando hasta el 89,00 % los vientos de entre los 2 y los 9 m/s.

## 4.4 Mareas

El nivel de marea, marea total o nivel del mar,  $S_{NM}$ , se obtiene como suma de las variables marea astronómica ( $S_{MA}$ ), componente determinista de la marea resultante de la atracción gravitatoria del sistema tierra-luna-sol, y marea meteorológica ( $S_{MM}$ ), componente aleatoria reflejo de las condiciones de presión atmosférica reinantes, según la expresión (4 – 3).

$$S_{NM} = S_{MA} + S_{MM} \quad (4 - 3)$$

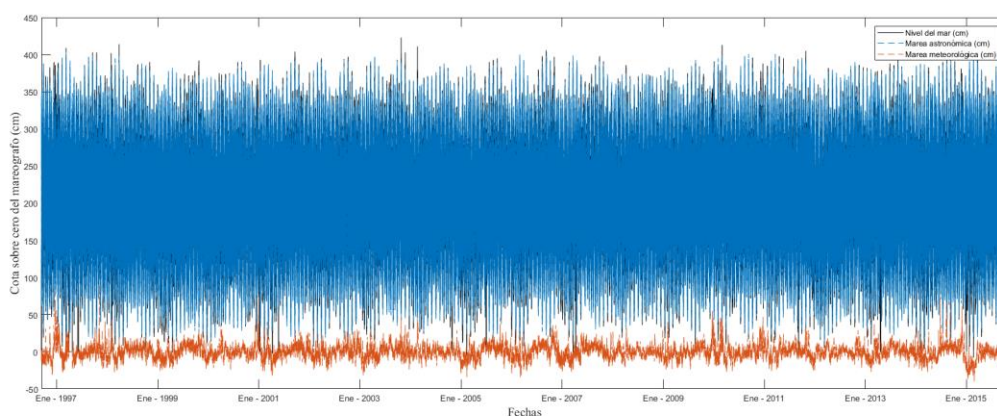


Figura 61 Nivel del mar, marea astronómica y marea meteorológica del mareógrafo Huelva 5

La marea astronómica es de carácter determinista y se define como la oscilación periódica del nivel de la mar inducida por fuerzas gravitacionales que actúan sobre las partículas de agua en la superficie de la Tierra. Es un fenómeno periódico muy complejo pero predecible, con distintas frecuencias según la componente de marea que se estudie. Es el resultado de la combinación de cuatro fuerzas actuantes que se enuncian a continuación.

- Atracción gravitatoria terrestre.
- Atracción gravitatoria lunar.
- Atracción gravitatoria solar.
- Fuerza centrífuga de rotación del sistema Luna – Tierra.

Descomponiendo la marea astronómica representada en la figura anterior en sus componentes armónicos de marea que se adjuntan a continuación de esta. Estos son los más significantes y son los que se han impuesto como condiciones de contorno abiertas en el modelo del tipo de nivel con forzamiento astronómico.

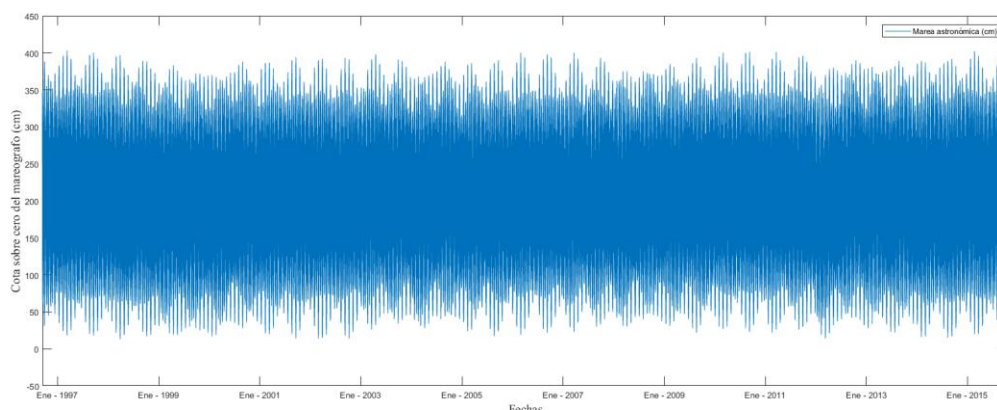


Figura 62 Marea astronómica del mareógrafo Huelva 5

Símbolo	Descripción	Frecuencia	Amplitud (cm)	Fase (°)
M2	Lunar principal	0,0805	97,26	143,56
S2	Solar principal	0,0833	36,95	88,92
N2	Lunar elíptica mayor	0,0790	19,92	189,32
K2	Lunisolar declinacional	0,0836	11,02	310,86
K1	Lunisolar declinacional	0,0418	6,60	72,89
O1	Solar principal	0,0387	5,74	10,80
P1	Lunar elíptica mayor	0,0415	2,25	21,56

Tabla 16 Armónicos de marea con amplitudes mayores de 2 cm en mareógrafo Huelva 5

A partir de dicho mareógrafo, se calcula la marea en la zona de estudio. Los valores de los armónicos de marea en la playa de Isla Canela son los siguientes.

Símbolo	Descripción	Frecuencia	Amplitud (cm)	Fase (°)
M2	Lunar principal	0,0805	101,64	55,96
S2	Solar principal	0,0833	36,59	82,08
N2	Lunar elíptica mayor	0,0790	21,50	39,95
K2	Lunisolar declinacional	0,0836	10,07	78,76
K1	Lunisolar declinacional	0,0418	6,65	48,77
O1	Solar principal	0,0387	5,81	308,21
P1	Lunar elíptica mayor	0,0415	1,91	41,24

Tabla 17 Armónicos de marea con amplitudes mayores de 2 cm en la playa de Isla Canela

La marea meteorológica es de tipo aleatorio y se define como la oscilación del nivel de la mar inducida por la acción de gradientes de presión atmosférica, por la tensión tangencial del viento sobre la superficie de agua y por la sobreelevación producida por el oleaje en la zona de rompientes (set-up).

En este estudio se ha despreciado la componente resultante de la acción de gradientes de presión atmosférica, debido a la escala espacial del mismo y la complejidad que supone incorporarla al modelo numérico.



## 5 MODELO NUMÉRICO

---

Al propagarse el oleaje desde aguas profundas hacia la costa, se producen fenómenos que modifican sus propiedades y que afectan a la distribución espacial de la energía. Estos fenómenos son la refracción, reflexión, asomeramiento (shoaling), rotura, fricción con el fondo, etc.

Desde un punto de vista práctico, se puede hablar de dos tipos de modelos de propagación de oleaje según los criterios que se enuncian a continuación:

- Aquellos que propagan oleaje monocromático (propagación de un tren de ondas de una única frecuencia y amplitud).
- Los que propagan un espectro de energía asociado a un oleaje irregular aleatorio.

El primer tipo de modelos generalmente se utiliza para caracterizar el patrón de oleaje en una zona de estudio, permitiendo la propagación de un gran número de trenes de onda monocromáticas gracias a su bajo costo computacional, los cuales se obtienen a partir de los regímenes medios direccionales en el área, que en el caso del presente trabajo se han tomado de un punto SIMAR de la zona.

Estos modelos representan bastante bien el patrón de oleaje, no obstante, tienden a sobreestimar las alturas de ola en profundidades reducidas. Pero si el objetivo es identificar los patrones de comportamiento del oleaje, estos modelos funcionan de manera satisfactoria.

El segundo tipo de modelos permite conocer en una zona de estudio más reducida con batimetrías correspondientes a aguas someras, la altura de ola estadísticamente representativa de un estado de mar (oleaje irregular aleatorio).

Este tipo de modelos son bastante precisos en el cálculo de las alturas de ola, para lo cual precisan de un alto coste computacional, razones por las cuales generalmente se aplican en la propagación de casos extraordinarios o en aquellos casos en los cuales se requiere obtener con una gran precisión los regímenes de oleaje en una zona de la costa, como en nuestro caso.

Como se introdujo en el apartado 3.3 Modelo numérico de propagación, el software utilizado de toda la oferta existente en el mercado para el desarrollo del modelo ha sido el modelo Delft3D. Se toma ese modelo por ser el que ofrece una mayor adaptación a las exigencias que se buscan en el presente trabajo, entre ellas la necesidad de un código que trabaje tanto en agua profundas como someras para estudiar la propagación del oleaje desde su generación hasta la costa.

Por otro lado, que tenga en cuenta los procesos físicos de disipación de energía, reflexión, refracción, interacciones no lineales, etc. y el hecho de que sea un software libre con multitud de manuales y guías disponibles hacen de este modelo el más idóneo.

Desarrollado por la Universidad tecnológica de Delft (Países Bajos), el modelo se crea para estimar las características del oleaje en zonas costeras, estuarios, lagos, canales, islas, etc. generados por vientos locales y corrientes ambientales. Se trata de una extensión de los modelos de tercera generación de aguas profundas para aguas someras.

Dentro del modelo Delft3D existen diferentes módulos de los cuales en el presente trabajo se utilizará única y exclusivamente el modelo WAVE.

En el presente capítulo se hará una definición del procedimiento seguido para el desarrollo del modelo y su calibración, indicándose los pasos seguidos, así como todos y cada uno de los valores que el modelo utiliza y su fundamento.

## 5.1 Datos de entrada

Para llevar a cabo la implementación del modelo en la zona donde se realiza el estudio es necesario definir los datos y parámetros de entrada que requiere el modelo numérico Delft3D que son los siguientes:

- Mallado (grid).
- Batimetría.
- Condiciones de contorno (boundaries).
- Obstáculos.
- Parámetros del modelo.
  - o Parámetros físicos.
  - o Parámetros numéricos.
- Punto de control para la calibración.

### 5.1.1 Mallado (grid)

La malla es la discretización del dominio físico para la propagación del oleaje y modelado hidrodinámico. En primer lugar, es necesario preparar los datos del terreno teniendo en cuenta que los datos positivos son relativos a datos batimétricos y por el contrario los datos topográficos han de ser datos negativos. La unión de batimetría y topografía se ha hecho uso del software MATLAB.

El diseño de la malla es un proceso que debe basarse en la experiencia y en un procedimiento de prueba – error hasta llegar a aquel mallado capaz de representar de la forma más fiable posible la realidad (Figura 63).

Los criterios empleados para la definición de la malla fueron:

- Orientar la malla correctamente para que abarque todo tipo de oleajes, creando dos contornos en aguas profundas que se correspondan con las direcciones predominantes.
- Ajustar la malla para que esta siga la batimetría intentando que los contornos se encuentren a la misma cota o perpendiculares a las curvas de nivel.
- Asegurar un buen anidamiento de las mallas, evitando que se inunden zonas de tierra seca.
- Evitar vértices que concentren mucha energía y que puedan impedir una buena propagación del oleaje.
- Evitar zonas que puedan impedir una buena propagación del oleaje, como zonas de tierra sin datos.

Finalmente se definieron tres mallas: una exterior, otra intermedia anidada en la exterior y otra interior más pequeña anidada en la intermedia con el fin de dar mayor precisión a la zona más cercana a la playa.

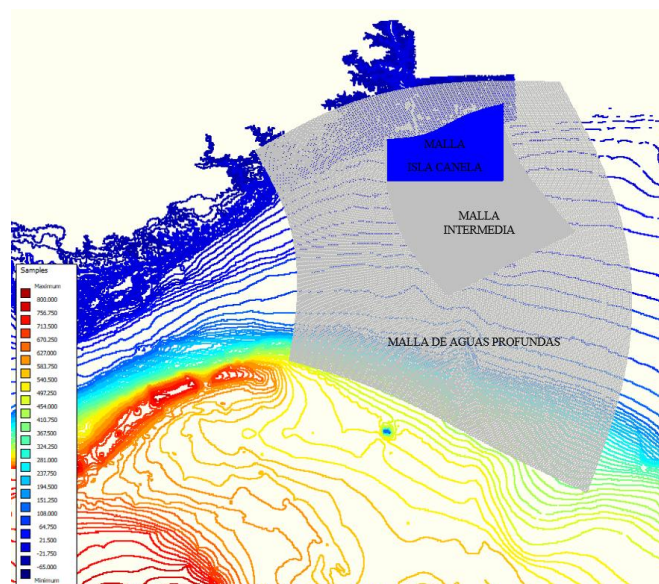


Figura 63 Mallado anidado de la zona de estudio



A continuación, se muestran las características de cada una de las tres mallas que se han utilizado en el desarrollo del trabajo.

#### 5.1.1.1 Malla de aguas profundas

Es la malla que cubre desde la posición de aguas profundas en la cual se encuentra el SIMAR que se ha tomado para propagar el oleaje hasta la costa.

Compuesta por cuatro contornos tipo “spline” trata de ajustarse lo más fielmente posible a la batimetría de la zona, o lo que es lo mismo, a la línea de costa, girando con ella a medida que se aproxima a esta. Debido a que los oleajes predominantes de la zona tienen direcciones predominantes entre SO y SE, facilita la propagación de estos mediante los dos contornos que se encuentran perpendicular a dicha dirección.

En cuanto a la resolución de la malla se ha tomado un valor grueso que permitiese la correcta y veloz computación de esta mediante el software. De este modo que se han fijado las dimensiones de las cuadrículas en 190 x 120 m cada una aproximadamente, obteniéndose un mallado de 244 x 244 elementos. Dado que su función no es más que la de la simple propagación hacia aguas intermedias, no es necesario aumentar dicha resolución.

#### 5.1.1.2 Malla intermedia

La malla intermedia tiene un fin puramente enfocado en una correcta computación, fundamentado en la gran distancia existente entre el punto SIMAR de propagación y la costa donde se precisa una gran resolución.

De este modo la función de dicha malla no es más que aumentar la resolución y hacer de puente para la propagación del oleaje hasta la malla de Isla Canela final.

El tamaño y la resolución de esta malla se ha fijado en unos valores de 100 x 100 m aproximadamente obteniéndose un mallado de 226 x 151 elementos.

#### 5.1.1.3 Malla de Isla Canela

La malla de Isla Canela tiene una condición distinta a las anteriores ya que es la que a posteriori se va a utilizar para los cálculos y el desarrollo del trabajo.

Es por ello por lo que debe tener la suficiente resolución capaz de representar los valores de rotura, set-up y demás efectos que se producen en las proximidades de la costa con la suficiente precisión.

De este modo el tamaño y la resolución de esta malla que se ha fijado ha sido de celdas de 25 x 25 m aproximadamente obteniéndose así un mallado de 325 x 649 elementos.

### 5.1.2 Batimetría

Como se introduce en el apartado 2.1. Topografía y batimetría, la batimetría de la zona de estudio ha sido extraída a partir de la batimetría de una zona amplia del Golfo de Cádiz proporcionada por parte de la tutora del presente proyecto Dña. Carmen Zarzuelo Romero, en formato de puntos (.xyz).

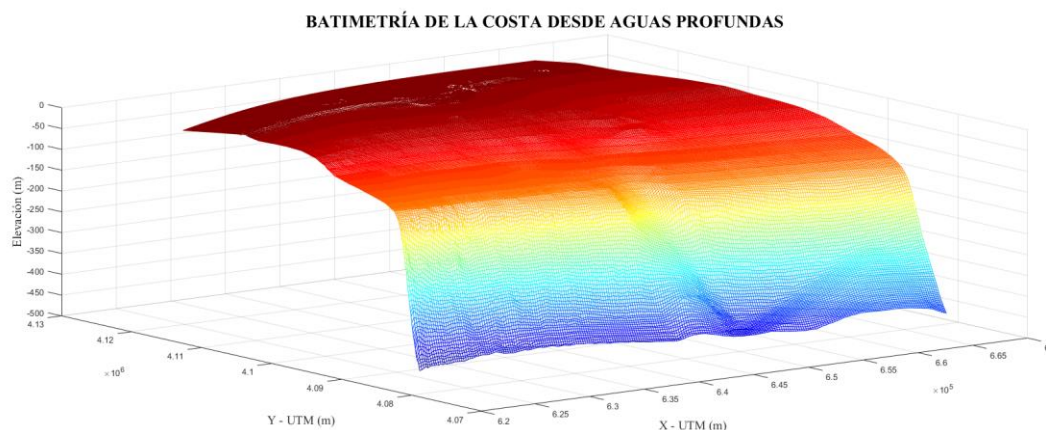


Figura 64 Batimetría de la malla exterior desde aguas profundas

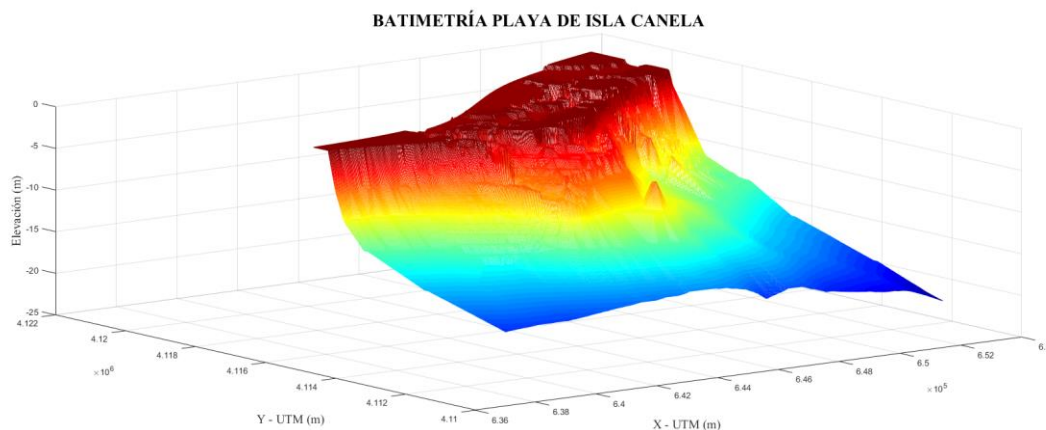


Figura 65 Batimetría de la malla de Isla Canela

### 5.1.3 Condiciones de contorno

De cara a la incorporación de las condiciones de contorno en el modelo, ha de generarse un archivo bajo el nombre de “wavecon”. Este archivo no es más que una recopilación a través de un archivo de texto de las variables que el modelo necesita introducir en sus contornos para la correcta propagación del oleaje.

Las variables que contiene el archivo son un total de ocho que se recogen en diferentes columnas y que son las que se indican a continuación:

- Fecha del momento del temporal a propagar (min).
- Altura de ola significativa (m).
- Periodo medio del oleaje (s).
- Dirección del oleaje (°).
- Dispersión.
- Nivel del mar (m).
- Velocidad del viento (m/s)
- Dirección de procedencia del viento (°)

Todas ellas, a excepción del nivel del mar que se obtiene a partir de REDMAR, son tomadas de forma directa del SIMAR que se ha seleccionado en aguas profundas para la propagación.

Además de la distribución en columnas, el archivo tendrá una estructura según el número de contornos que vayan a tomarse como condiciones de contorno, en el caso del presente trabajo se han tomado los tres contornos que se encuentran con orientación aproximadas de Este, Sur y Oeste.

De igual manera, en este archivo se tiene en cuenta la condición de contorno (boundaries) del modelo, por lo que el nombre de esta condición de contorno deberá ser el mismo que el de la condición de contorno del modelo y además su extensión debe ser el nombre que se le haya asignado al modelo, por ejemplo en este trabajo se le ha llamado “wavecon.IslaCanela”.

### 5.1.4 Obstáculos

Además de las condiciones de contorno, el modelo permite modelizar aquellos obstáculos que se encuentren dentro de la malla definida como pueden ser espigones, diques o cualquier interferencia que pueda afectar a la propagación del oleaje. Se han modelizado un total de cuatro obstáculos que se pueden observar en la Figura 66 y que se enuncian a continuación:

- Espigón de Vila Real de Santo Antonio.
- Contención de escollera playa de Isla Canela.
- Espigón de Punta del Moral.
- Espigón de Isla Cristina.



Figura 66 Obstáculos simulados dentro de la zona de estudio

Para la incorporación de los obstáculos al modelo, éste precisa las coordenadas, definiendo cada obstáculo como una polilínea en planta. Una vez definidos geoméricamente en planta se le asocia unos valores correspondientes a la cota de coronación (tomando como referencia el nivel del mar en cada momento), coeficiente de reflexión y los coeficientes dependientes de la forma del espigón (alpha y beta).

A continuación, en la Tabla 18 se muestran los valores de cada uno de los obstáculos simulados:

OBSTACULO	ALTURA (m)	COEF. REFLEXIÓN	$\alpha$	$\beta$
E. Vila Real Sto. Antonio	3,00	0,70	1,8	0,1
Contención Isla Canela	2,00	0,70	1,8	0,1
E. Punta del Moral	3,00	0,70	1,8	0,1
E. Isla Cristina	3,00	0,70	1,8	0,1

Tabla 18 Parámetros de modelización de los obstáculos del modelo

### 5.1.5 Parámetros del modelo

El modelo, como cualquier otro modelo numérico, precisa de ciertos parámetros de ajuste para ser capaz de reproducir fielmente la realidad de los procesos de propagación.

Dichos parámetros han sido calibrados y elegidos según el proceso de calibración del modelo que se describe en el apartado 3.3.5 Calibración del modelo.

De cara a conocer una definición detallada de la descripción de cada uno de los parámetros que utiliza el modelo, véase el Apéndice C: Parámetros del modelo.

### 5.1.6 Punto de control

Por último, para la correcta calibración del modelo se precisa tener conocimiento de las tres variables que se utilizarán que serán la altura de ola, el periodo y la dirección en un punto en el que se tengan registros reales de esas mismas variables y se conozcan sus coordenadas. El punto de control que se ha tomado ha sido el punto SIMAR 1051048, con coordenadas 37,00 N, 7,25 O, a una profundidad indefinida (aguas profundas) (Figura 28).

## 5.2 Calibración del modelo

El modelo Delft3D desarrollado se ha calibrado y probado para una semana al azar del periodo temporal de registros que se tiene del SIMAR. Se toma como variable de calibración el parámetro de Collins y se calculan para cada valor del parámetro, los indicadores de comprobación del ajuste descritos en el apartado 3.3.5 Calibración del modelo.

Las variables a evaluar son la altura de ola, periodo pico y la dirección del oleaje. En la Figura 67, Figura 68 y Figura 69 se muestra el ajuste gráfico desarrollado de la altura de ola, periodos pico y direcciones para la semana comprendida entre el 30 de Septiembre y el 07 de Octubre de 1990 (60 estados de mar).

La representación muestra en color azul oscuro las variables obtenidas según los registros del SIMAR que se toma de referencia. En colores verde, rojo y cian se muestran los diferentes valores obtenidos para distintos coeficientes de Collins.

Nótese que la variación del coeficiente de Collins, de forma gráfica, a excepción del periodo pico, no influye de una forma excesivamente visible. Por este motivo se seleccionará el coeficiente en función de los valores que se obtengan del error cuadrático medio, el coeficiente de correlación y el parámetro de Skill.

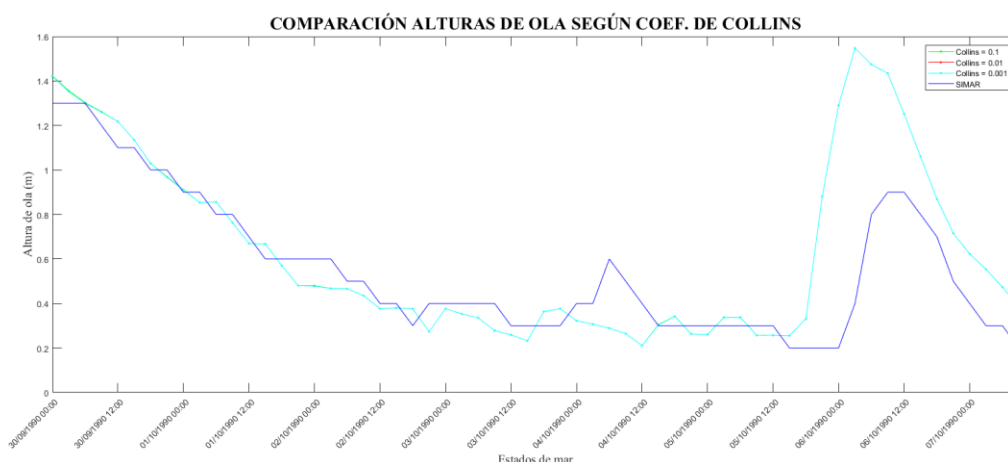


Figura 67 Comparación de alturas de ola según diferentes coeficientes de Collins

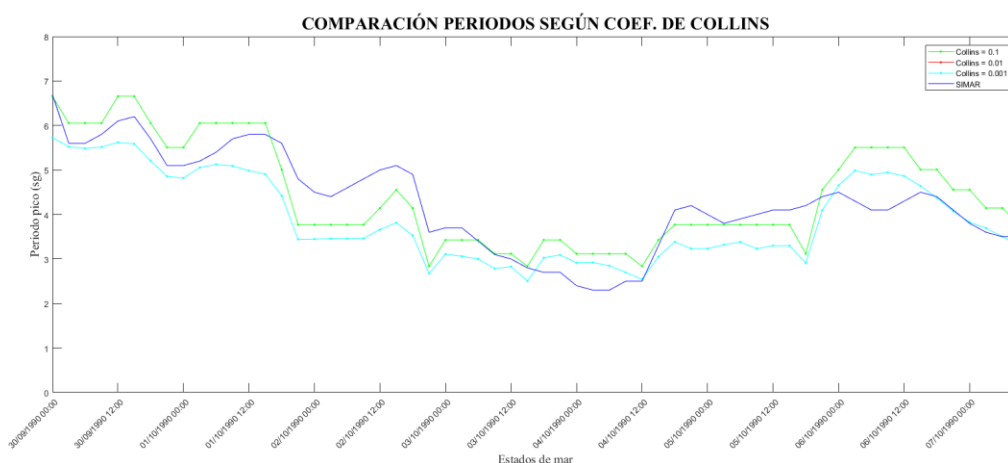


Figura 68 Comparación de alturas de ola según diferentes coeficientes de Collins

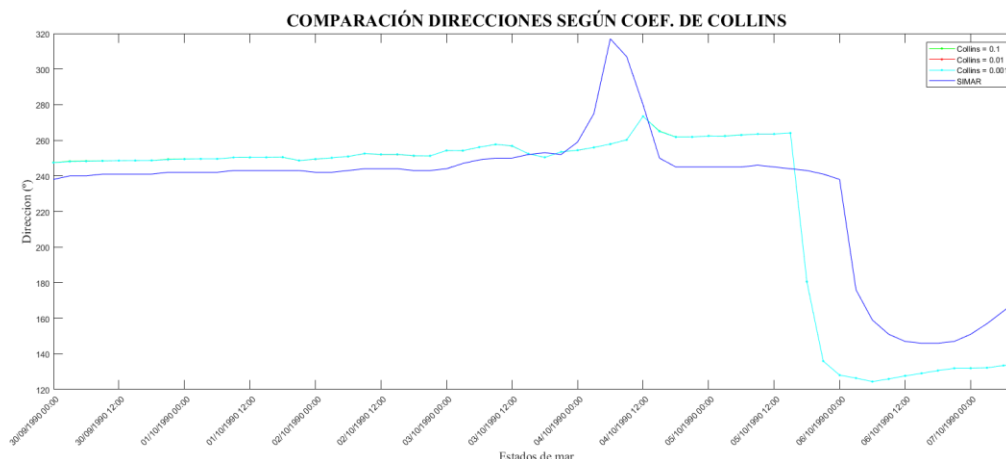


Figura 69 Comparación de alturas de ola según diferentes coeficientes de Collins

A continuación, en la Tabla 19, Tabla 20 y en la Tabla 21 se recogen en los valores de los coeficientes de correlación, Skill y error cuadrático medio para las distintas variables y los distintos coeficientes de Collins probados.

ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE			
PARÁMETRO DE COLLINS	RMSE	R	S
0,100	0,276	0,737	0,709
0,010	0,276	0,737	0,709
0,001	0,276	0,737	0,709

Tabla 19 Valores de los coeficientes de ajuste para alturas de ola

PERIODO PICO			
PARÁMETRO DE COLLINS	RMSE	R	S
0,100	0,631	0,835	0,839
0,010	0,699	0,822	0,777
0,001	0,699	0,822	0,777

Tabla 20 Valores de los coeficientes de ajuste para periodos

DIRECCIÓN			
PARÁMETRO DE COLLINS	RMSE	R	S
0,100	27,794	0,842	0,816
0,010	27,787	0,842	0,816
0,001	27,788	0,842	0,816

Tabla 21 Valores de los coeficientes de ajuste para direcciones del oleaje

### 5.2.7 Resultados de la calibración

Tras hacer las comprobaciones, atendiendo al mejor comportamiento general para cada una de las variables analizadas, se toma como valor del coeficiente de Collins 0,10 quedando así calibrado el modelo para un coeficiente de correlación medio de 0,80 y de Skill de 0,79.

A continuación, se indican los valores de cada uno de los parámetros que se han utilizado en el modelo. Los valores se han tomado a partir de los estudios previos volcados en el Trabajo Fin de Grado “Evolución morfodinámica de la costa de Isla Canela” (Rojas Ramos, 2018).

#### 5.2.7.1 Parámetros de resolución espectral

- |  |         |
|--|---------|
| - Numero de direcciones                | 72      |
| - Frecuencia más baja                  | 0,03 Hz |
| - Frecuencia más alta                  | 1,00 Hz |
| - Número de contenedores de frecuencia | 37      |

#### 5.2.7.2 Parámetros físicos

##### CONSTANTES

- |                      |                        |
|----------------------|------------------------|
| - Gravedad           | 9,81 m/sg              |
| - Densidad del agua  | 1025 Kg/m <sup>3</sup> |
| - Norte              | 90,00°                 |
| - Profundidad mínima | 0,05 m                 |

##### PROCESOS

- |                                       |         |
|---------------------------------------|---------|
| - Rotura inducida por el fondo        |         |
| ○ Alpha                               | 1,00    |
| ○ Gamma                               | 1,20    |
| - Interacciones triádicas no lineales |         |
| ○ Alpha                               | 0,10    |
| ○ Beta                                | 9       |
| - Fricción del fondo                  |         |
| ○ Modelo                              | Collins |
| ○ Coeficiente de fricción             | 0,10    |
| - Difracción                          |         |
| ○ Coeficiente de suavizado            | 0,90    |
| ○ Pasos de suavizado                  | 900     |

##### VARIOS

- |                   |                    |
|-------------------|--------------------|
| - Descrestamiento | Van der Westhuysen |
|-------------------|--------------------|

#### 5.2.7.3 Parámetros numéricos

- |  |         |
|--|---------|
| - Porcentaje de puntos mojados en la malla | 98,00 % |
| - Número máximos de iteraciones            | 15      |



## 6 ANÁLISIS DEL MODELO

A través del modelo numérico, se obtienen los valores de la propagación desde aguas profundas a la costa del régimen extremal registrado por el SIMAR.

Para el correcto análisis de la influencia del oleaje en la costa, se ha dividido la zona de estudio a través de un total de ocho perfiles que se describirán al comienzo del capítulo.

Fijados y obtenidos dichos perfiles se hace un análisis de los resultados proporcionados por el modelo en cada uno de los escenarios planteados. Los resultados de la propagación se representan a través de ocho puntos de control.

En cuanto a la escala temporal, el análisis se divide como se ha venido explicando en dos escenarios: un primer escenario en el cual se analiza la serie temporal entre 1977 y 2009, con el fin de ofrecer una relación y una comparación de resultados con respecto a los datos ofrecidos por REDIAM y un segundo escenario que se encarga del análisis de los temporales posteriores a 2009, comprobando si la dinámica de la playa se mantiene o cambia.

Los parámetros que se analizan en este capítulo correspondientes a los estados de mar de cada escenario planteado son la propagación del oleaje (altura de ola y dirección), los parámetros de rotura del oleaje y la tasa de transporte longitudinal de sedimentos.

### 6.1 Propagación del oleaje

En los próximos apartados se muestran los resultados obtenidos de la propagación tanto por medio del modelo en cada uno de los puntos extremos de los perfiles que se han descrito en el apartado anterior (Figura 70).

Todos los resultados de la propagación del oleaje que se resumen y exponen en este apartado se encuentran de forma completa en el Apéndice D: Resultados de la propagación.

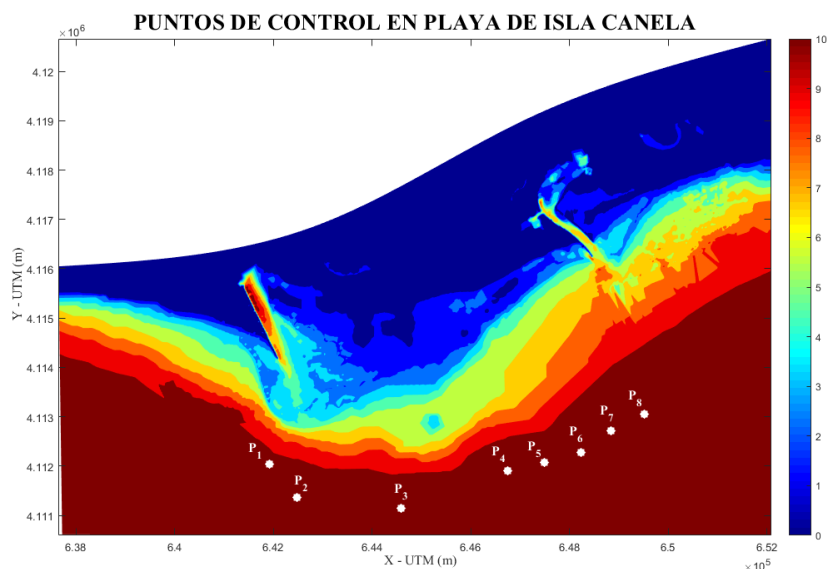


Figura 70 Puntos de control del oleaje en la playa de Isla Canela

### 6.1.1 Escenario 1: 1977 – 2009

La serie temporal que se analiza estudia los estados de mar correspondientes al régimen extremal entre los años de 1977 y 2009.

El número de tormentas totales que se han contabilizado en el periodo considerado asciende hasta el valor de 106 estados de mar distintos.

Se muestra a continuación en la Figura 71 una gráfica con el registro de las alturas de ola correspondientes a cada una de las tormentas de este escenario.

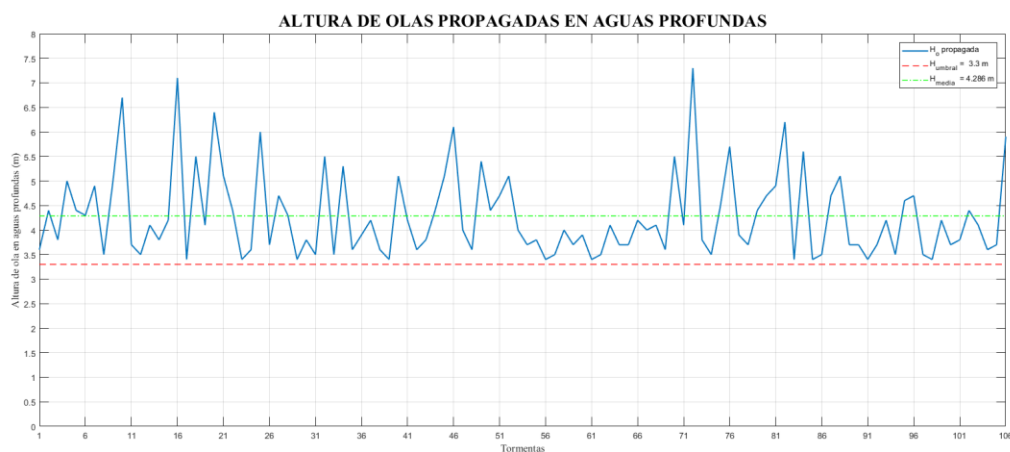


Figura 71 Altura de ola en aguas profunda en el Escenario 1

Por otro lado, se muestran las gráficas de las alturas de ola en cada uno de los ocho puntos en los que se han calculado (paneles de la izquierda Figura 72 - Figura 79), y las gráficas del histograma de las alturas de ola que se obtienen de la simulación numérica (paneles de la derecha Figura 72 - Figura 79).

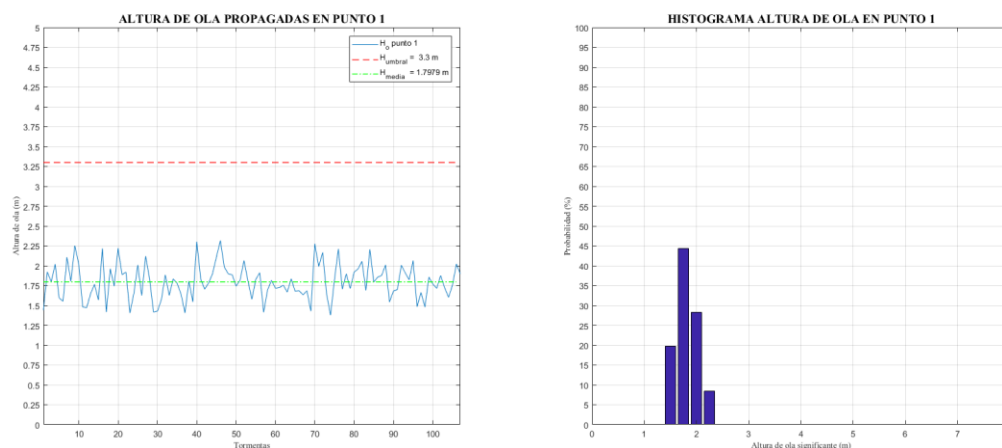


Figura 72 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 1 en el punto 1



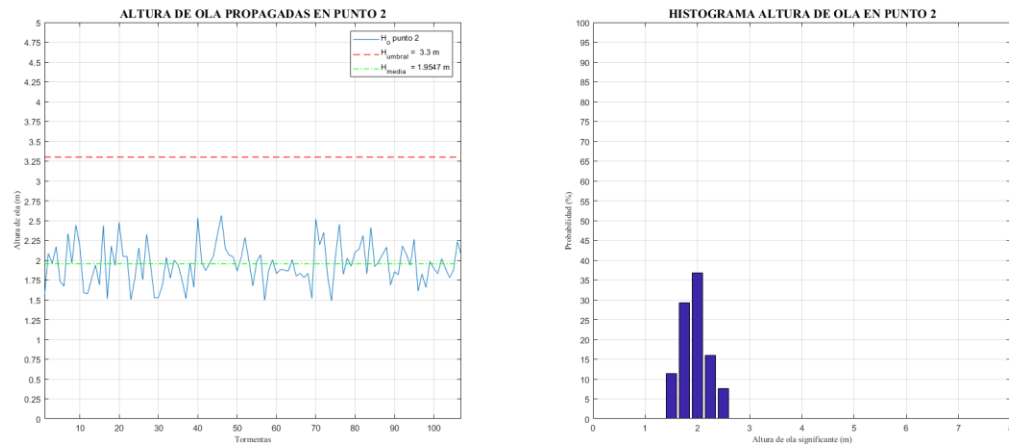


Figura 73 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 1 en el punto 2

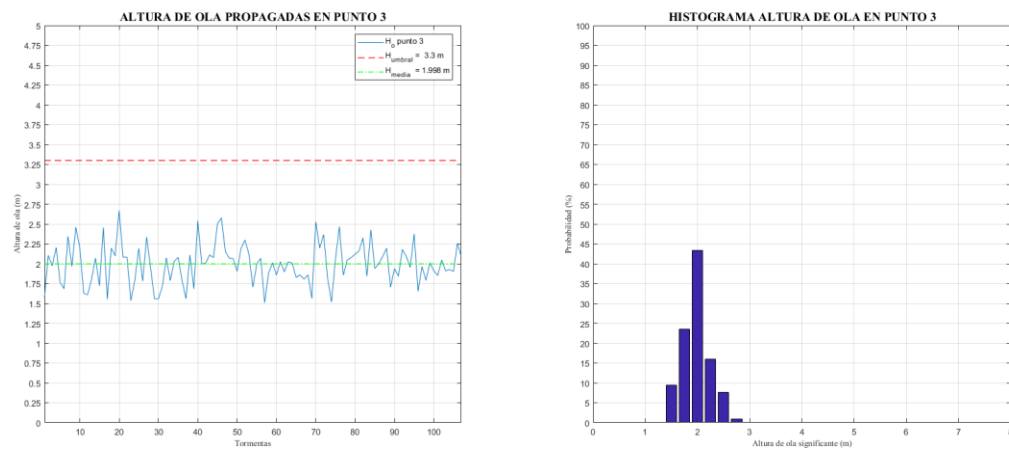


Figura 74 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 1 en el punto 3

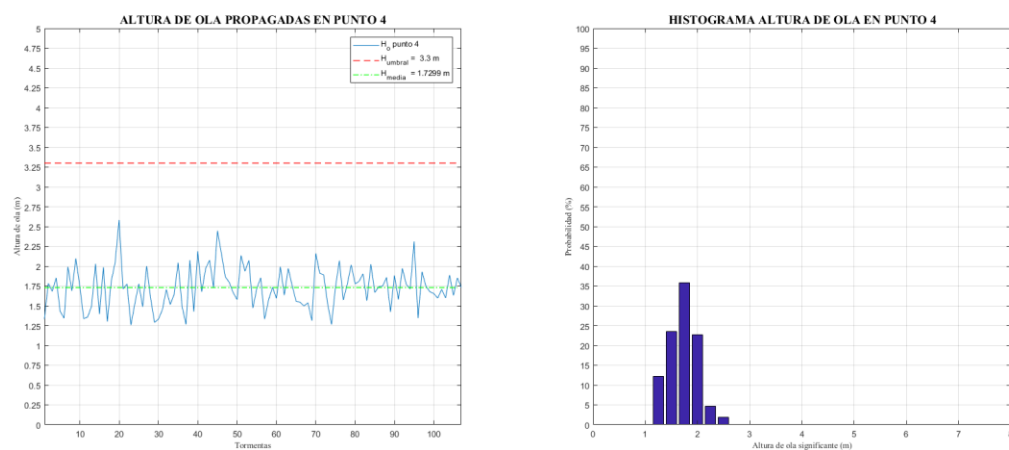


Figura 75 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 1 en el punto 4

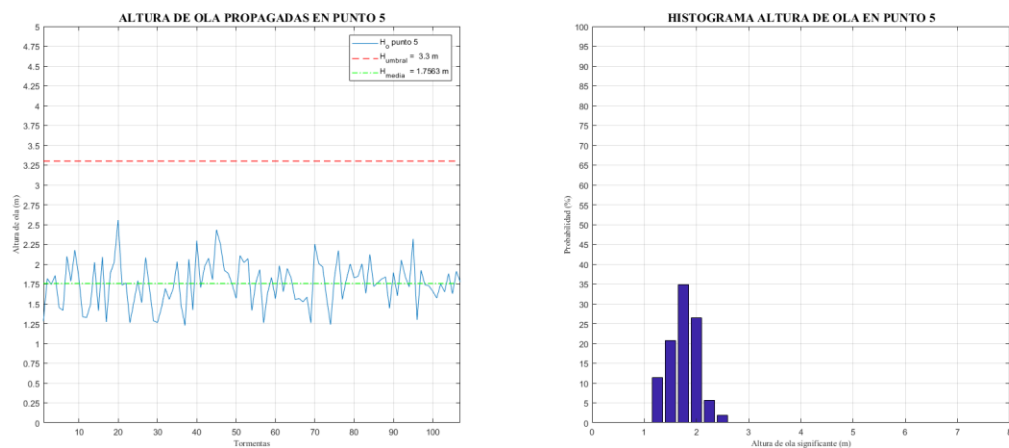


Figura 76 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 1 en el punto 5

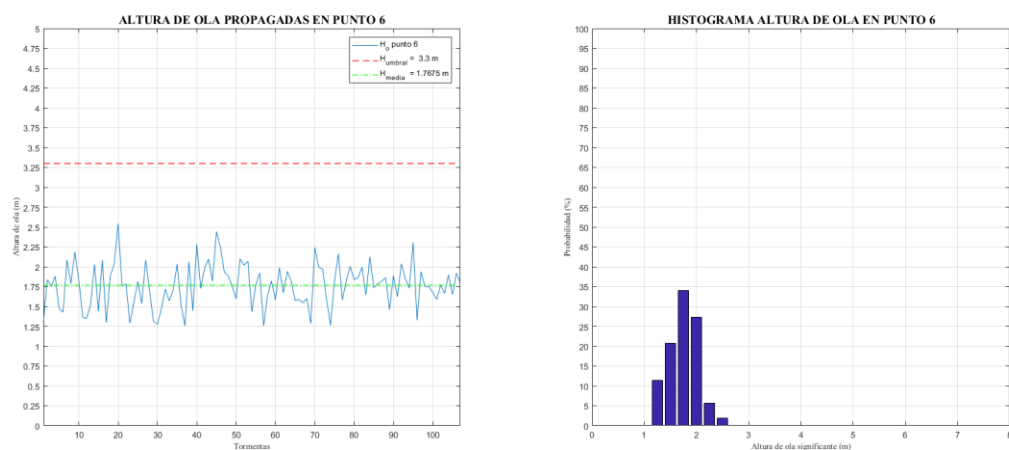


Figura 77 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 1 en el punto 6

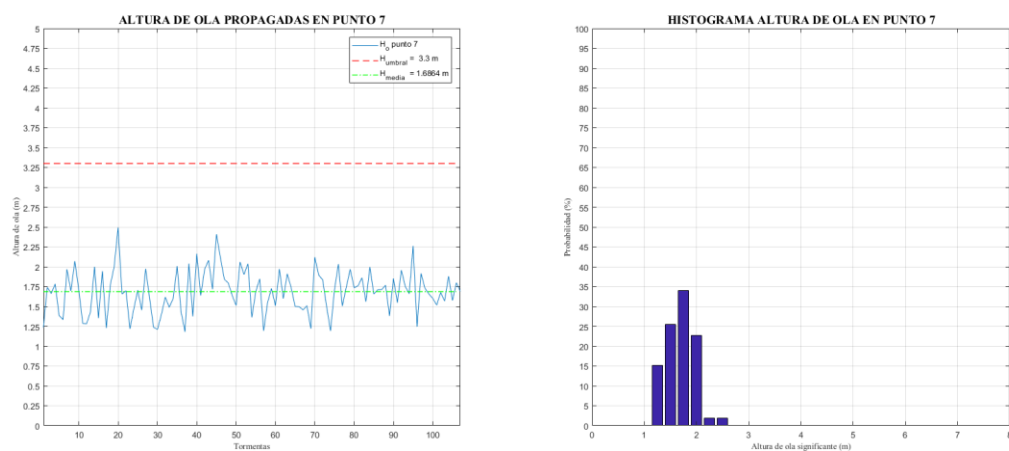


Figura 78 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 1 en el punto 7

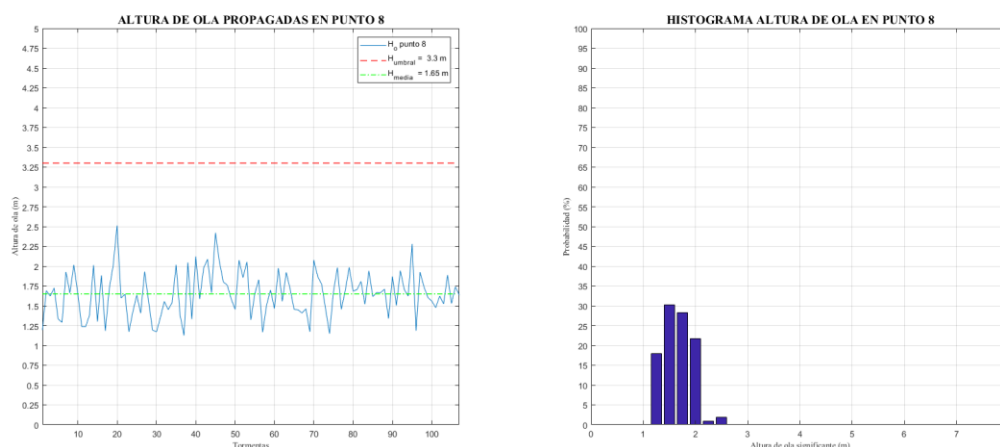


Figura 79 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 1 en el punto 8

A continuación, en la Tabla 22, se muestra un cuadro resumen en el que se indica la altura de ola media, así como los valores máximos y mínimos obtenidos a partir de la simulación numérica de la propagación en cada uno de los puntos.

PUNTO	H <sub>media</sub> (m)	H <sub>min</sub> (m)	H <sub>max</sub> (m)
1	1,80	1,38	2,32
2	1,95	1,49	2,56
3	2,00	1,51	2,67
4	1,73	1,26	2,58
5	1,76	1,23	2,56
6	1,77	1,26	2,54
7	1,69	1,18	2,49
8	1,65	1,13	2,51

Tabla 22 Valores extremos de las alturas de ola en los puntos de control en Escenario 1

Como se observa en los resultados obtenidos, la tendencia tanto en los máximos como en los mínimos es la de un ascenso a medida que se avanza desde el punto 1 hacia el punto 3, separándose del espigón de Vila Real de Sto. Antonio y acercándose al tómbolo de poniente (Figura 2), que continúa con un descenso de los valores entre dicho punto y el punto 8.

Nótese que el descenso que se produce entre el punto 3 y el punto 8 tiene un leve repunte entre los puntos 5 y 6, coincidentes con la zona del tómbolo de levante (Figura 2), pero sin llegar a los valores que se alcanzan en el tómbolo de poniente. Esto se observa mejor en los valores medios y mínimos que en los máximos donde la tendencia y las variaciones son más suaves.

Cuantitativamente hablando, se produce una variación de 20 cm a lo largo de la costa en cuanto a las alturas de ola máximas, a excepción del punto 1 que registra un valor inferior, mientras que en las mínimas se observa una horquilla prácticamente 40 cm, entre el punto 3 y el punto 8.

Los resultados que se obtienen a través de los histogramas, como no puede ser de otra manera, van en la misma línea que los valores extremos y la media, describiendo el primer punto un histograma estrecho concentrando la totalidad de alturas de ola entre 1,25 y 2,50 m con un pico en los valores comprendidos entre los 1,75 y 2,00 m de altura que concentra prácticamente el 45 % de los valores.

A medida que se avanza y se aproxima al punto 3 el histograma se va abriendo, llegando a comprender valores entre los 1,50 y 2,75 m de altura, con un pico de la misma magnitud que el punto 1 pero esta vez en las alturas comprendidas entre los 2,00 y 2,25 m.

A partir de ahí, la tendencia es decreciente abriéndose el histograma hacia valores más pequeños, desapareciendo prácticamente las alturas grandes y con picos del orden del 30% en valores entre los 1,75 y 2,00 m, a excepción del punto 8 que baja aún más el pico hasta valores comprendidos en el rango de 1,50 a 1,75 m, aunque prácticamente igualado con su rango superior.

Analizadas las alturas de ola, a continuación, se muestran las rosas de oleaje de cada uno de los puntos de análisis, con el fin de tener una visión de la dirección con la que incide el oleaje en cada uno de los puntos y la vinculación que esta tiene con alturas mayores o menores (Figura 80 - Figura 83).

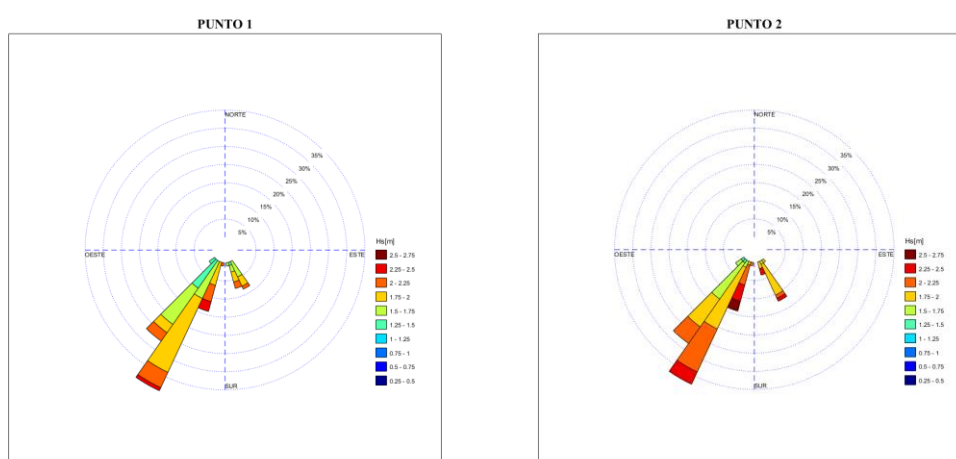


Figura 80 Rosa de oleaje en el Escenario 1 en los puntos 1 y 2

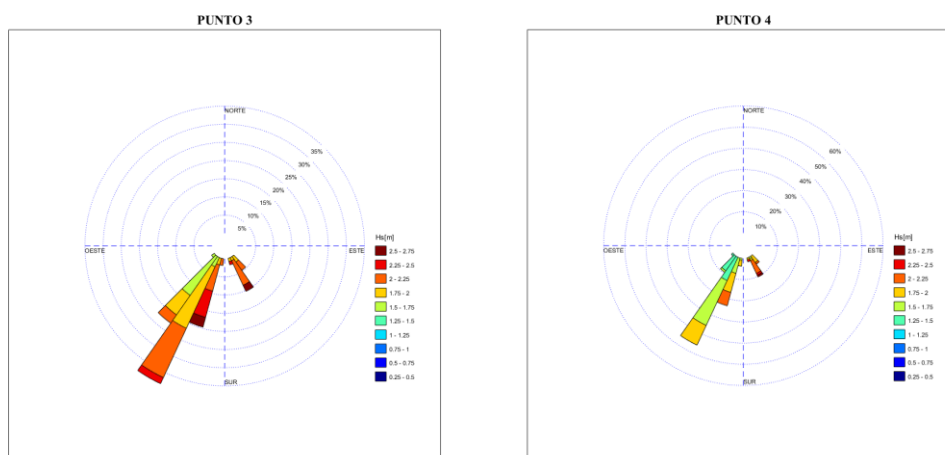


Figura 81 Rosa de oleaje en el Escenario 1 en los puntos 3 y 4

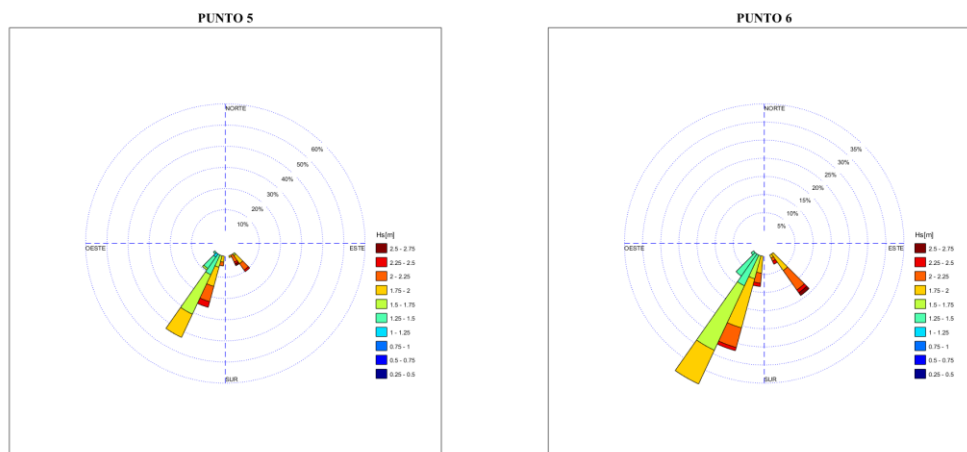


Figura 82 Rosa de oleaje en el Escenario 1 en los puntos 5 y 6

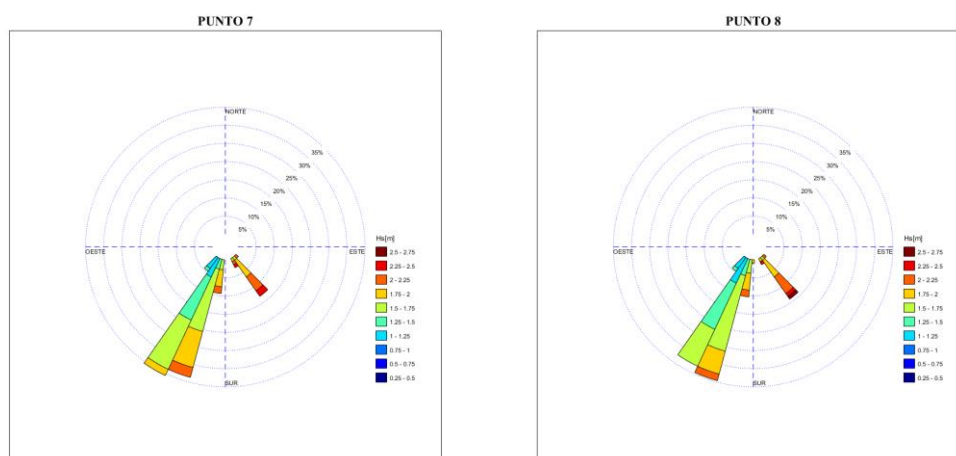


Figura 83 Rosa de oleaje en el Escenario 1 en los puntos 7 y 8

Como se observa de forma ampliamente marcada en todos y cada uno de los puntos, los temporales de la zona inciden en la costa con dos direcciones predominantes que son las del Sureste y el Suroeste.

De igual modo se observa cómo de forma general los temporales con dirección Suroeste son más frecuentes que los del Sureste. Aun así, las alturas de ola asociadas a los oleajes del Sureste no son nada despreciables encontrándose grandes franjas con valores superiores a los 1,75 m de altura de ola.

Nótese que, de cara a una representación gráfica admisible, se han representado las rosas de oleaje de los puntos 4 y 5 con rangos de frecuencias que alcanzan hasta el 60% mientras que el resto no sobrepasan el 35%.

Al igual que se hiciera para los valores del punto SIMAR en aguas profundas, se ha realizado el ajuste del oleaje en cada uno de los puntos a través de una función de densidad de tipo Weibull y cuyas gráficas de la densidad de probabilidad de cada uno de los puntos se muestran a continuación (Figura 84 - Figura 87).

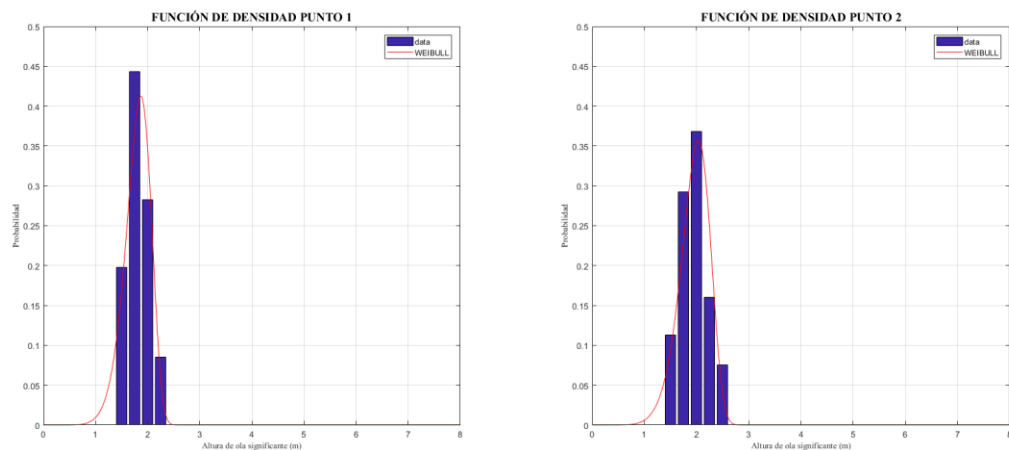


Figura 84 Función de densidad de probabilidad en el Escenario 1 en los puntos 1 y 2

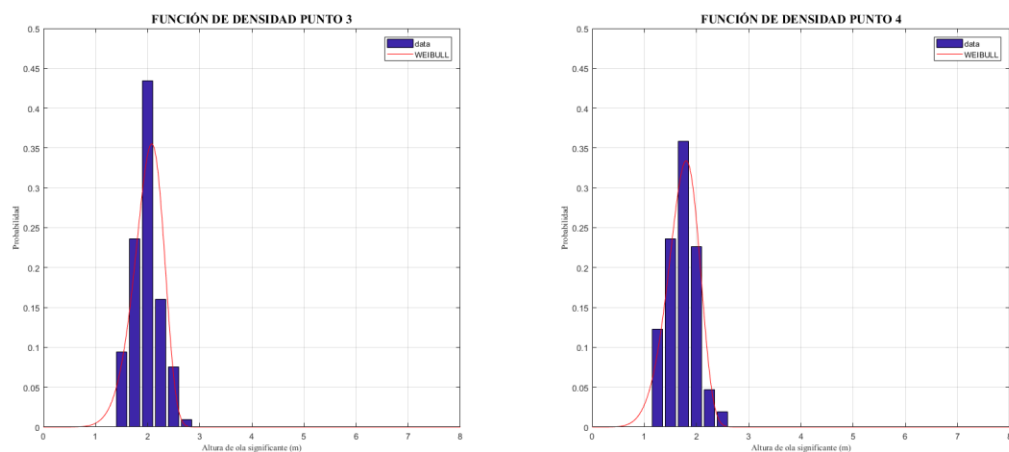


Figura 85 Función de densidad de probabilidad en el Escenario 1 en los puntos 3 y 4

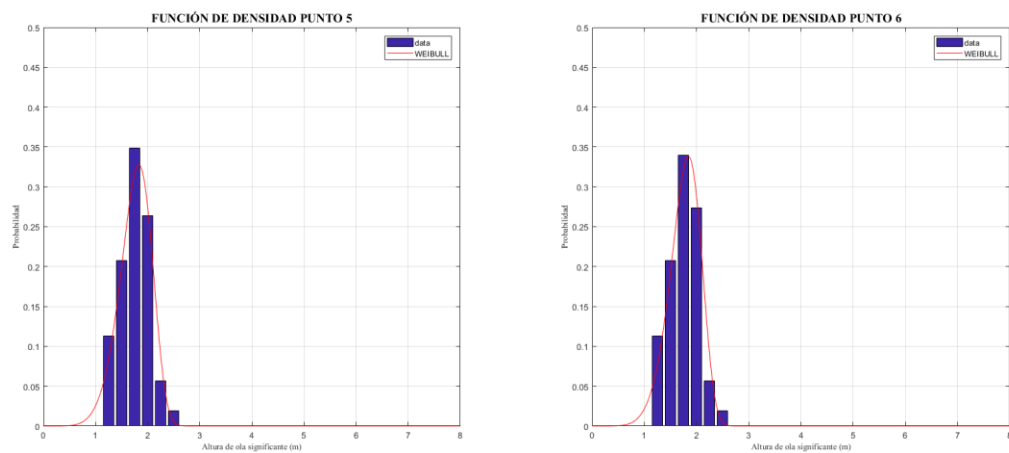


Figura 86 Función de densidad de probabilidad en el Escenario 1 en los puntos 5 y 6

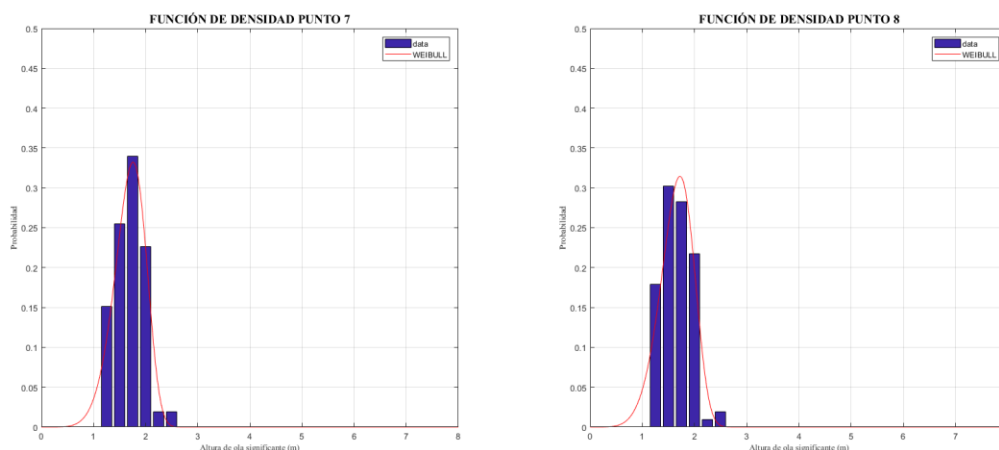


Figura 87 Función de densidad de probabilidad en el Escenario 1 en los puntos 7 y 8

Al igual que ocurriese con los histogramas, se observa un aumento de la altura de ola estrechándose y aumentando el valor del pico en el histograma y por tanto la función de densidad de probabilidad hasta alcanzar el punto 3 donde de nuevo comienza a abrirse el histograma y la función baja su pico cogiendo una forma más suave, haciéndose más frecuentes alturas de ola más bajas.

### 6.1.2 Escenario 2: 2009 – 2015

Analizado el primer escenario, se pasa a la simulación y análisis del segundo escenario en el cual se aumentará el periodo temporal desde el año 2009 que finaliza el escenario 1, hasta el año 2015, comprobando así si la tendencia continua o no.

Esta vez según los datos del SIMAR (Puertos del Estado) se contabilizan en el periodo de estudio un total de 26 tormentas que superan el umbral impuesto de alturas mayores de 3,30 m en aguas profundas, así como de una separación mínima entre temporales de 36 horas. Esas tormentas, al igual que se ha hecho antes, se caracterizarán con su altura de ola significativa y dirección correspondiente.

Se muestra en la Figura 88 la gráfica correspondiente a la altura de ola en aguas profundas de cada estado de mar que se pasará a analizar en este escenario, así como el valor medio de estos y el valor umbral.

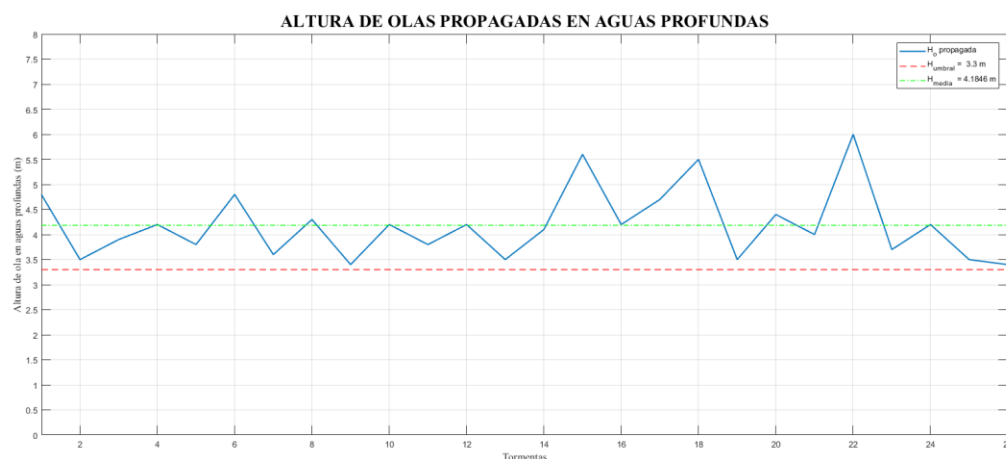


Figura 88 Altura de ola en aguas profunda en el Escenario 2

A continuación, siguiendo los mismos criterios seguidos en el escenario 1, se pasa a exponer las gráficas correspondientes a la altura de ola simulada en cada uno de los puntos que se está analizando el modelo, así como el histograma de dichas alturas de ola.

Se muestran las gráficas de las alturas de ola en cada uno de los ocho puntos en los que se han calculado (paneles de la izquierda Figura 89- Figura 96), y las gráficas del histograma de las alturas de ola que se obtienen de la simulación numérica (paneles de la derecha Figura 89 - Figura 96).

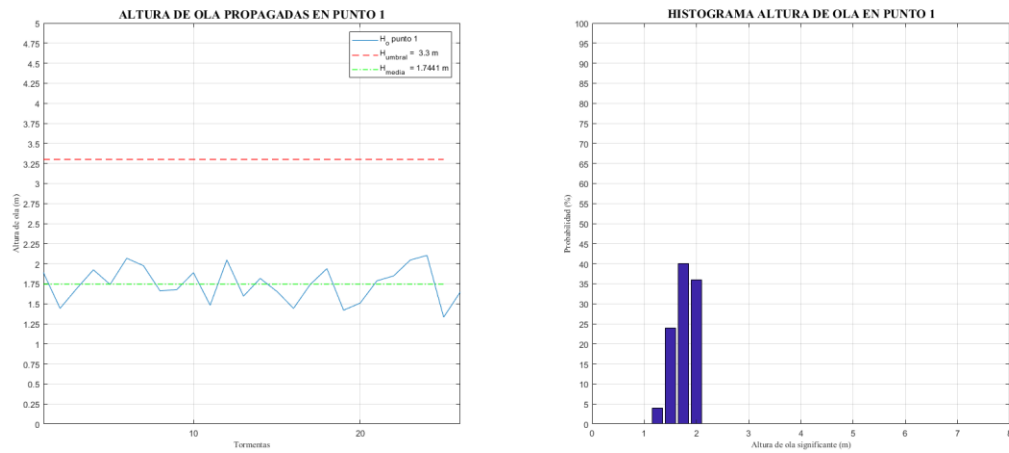


Figura 89 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 2 en el punto 1

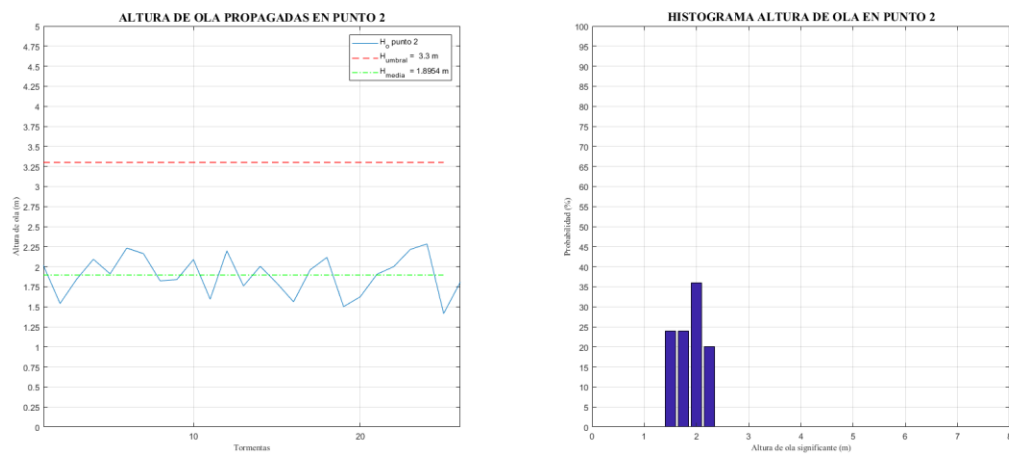


Figura 90 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 2 en el punto 2

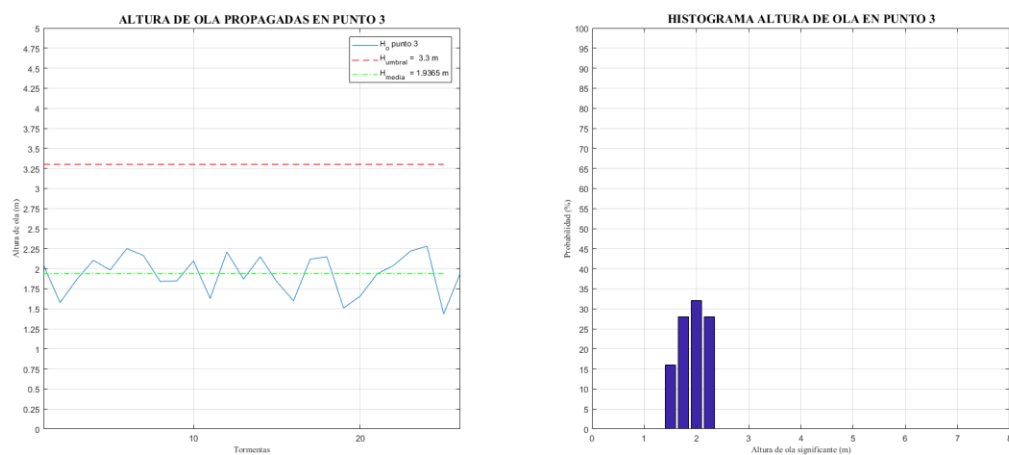


Figura 91 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 2 en el punto 3



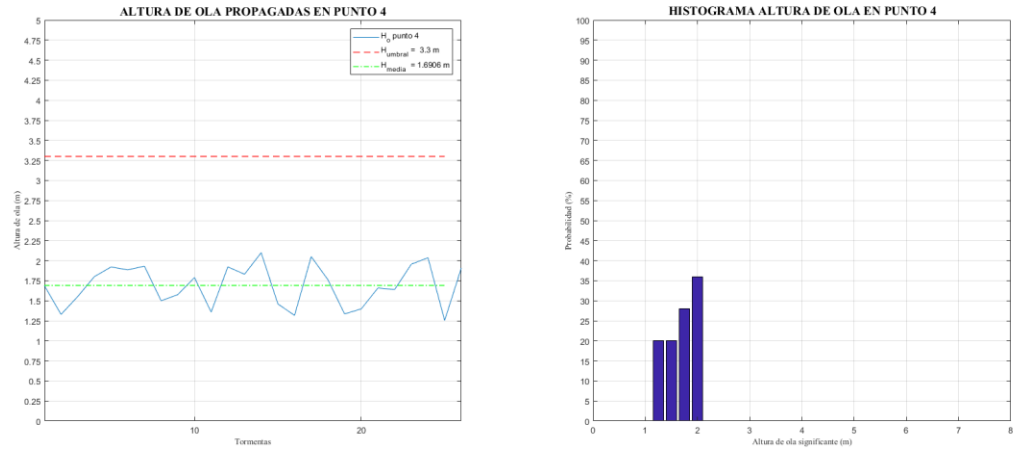


Figura 92 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 2 en el punto 4

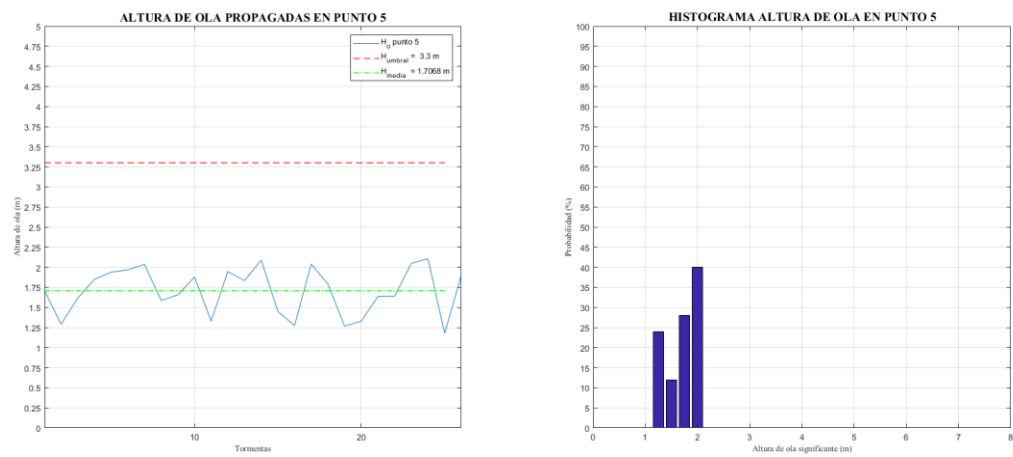


Figura 93 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 2 en el punto 5

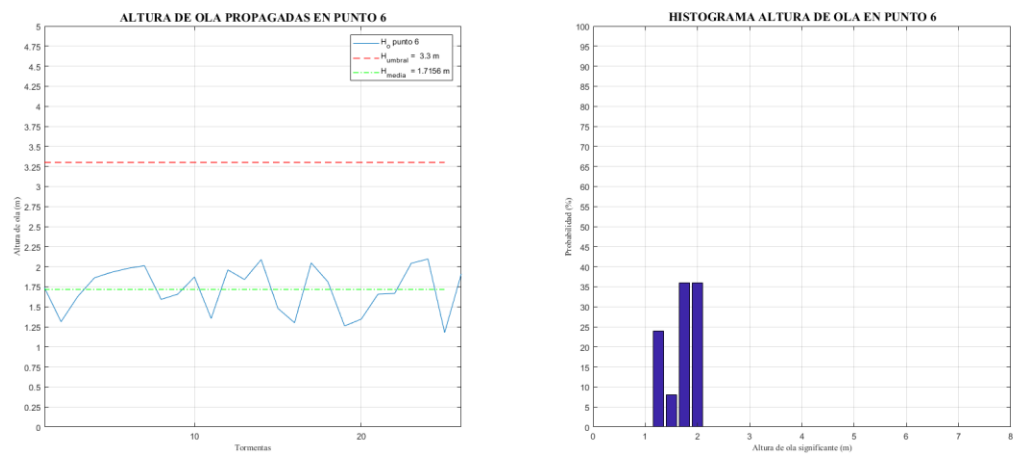


Figura 94 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 2 en el punto 6

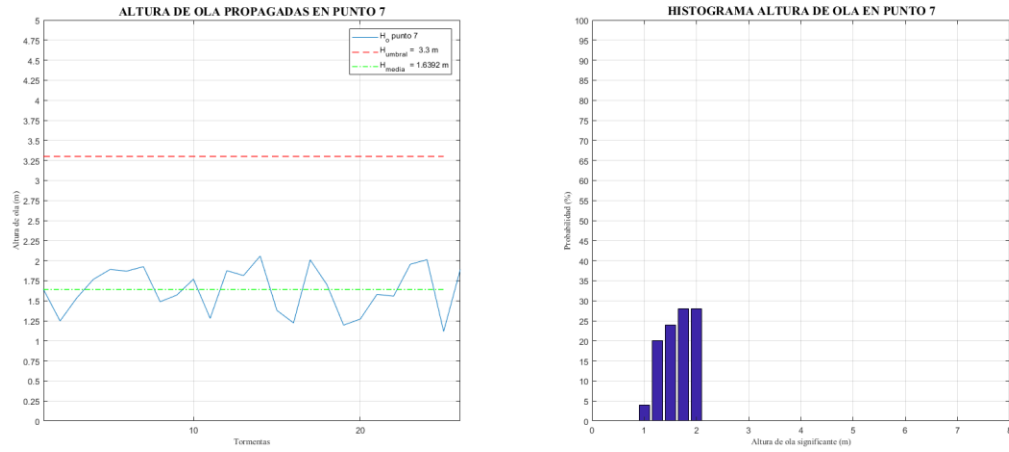


Figura 95 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 2 en el punto 7

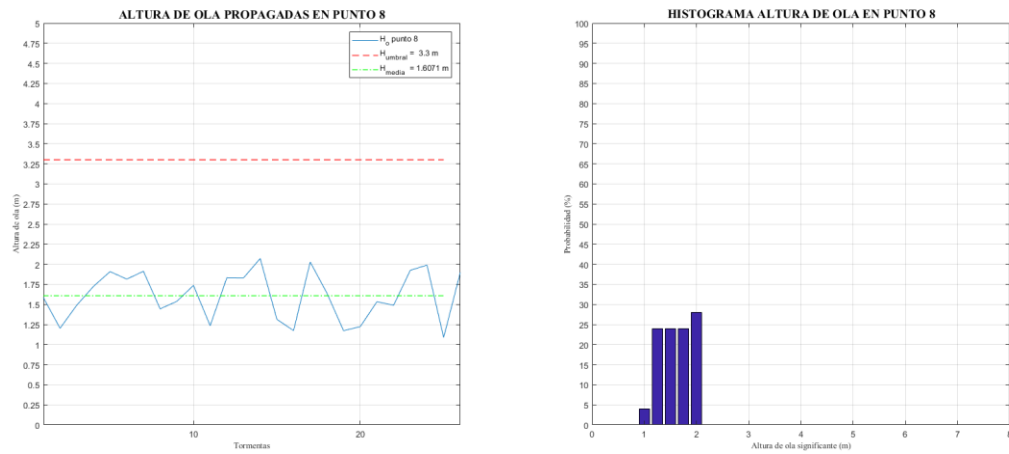


Figura 96 Altura de ola en aguas y su histograma en el Escenario 2 en el punto 8

A continuación, en la Tabla 23 se muestra un cuadro resumen en el que se indican la altura de ola media, así como los valores máximos y mínimos obtenidos a partir de la simulación numérica de la propagación en cada uno de los perfiles.

PUNTO	$H_{\text{media}} \text{ (m)}$	$H_{\text{min}} \text{ (m)}$	$H_{\text{max}} \text{ (m)}$
1	1,74	1,33	2,10
2	1,90	1,41	2,28
3	1,94	1,43	2,28
4	1,69	1,25	2,10
5	1,71	1,18	2,11
6	1,72	1,18	2,10
7	1,64	1,12	2,06
8	1,61	1,09	2,07

Tabla 23 Valores extremos de las alturas de ola en los puntos de control en Escenario 2

Con respecto a los valores de las alturas de ola y sus histogramas en este segundo escenario, se observa como siguen la misma tendencia descrita en el escenario 1.

De ese modo, las alturas de ola máxima, así como las mínimas y por consecuente la media, experimenta un incremento a medida que se pasa del punto 1 al punto 3 para una vez superado el tómbolo de poniente, experimentar un descenso general hasta llegar al punto 8.

Como ocurría en el escenario 1 se sigue produciendo el repunte leve en la zona del tómbolo de levante, pero sin llegar a despuntar como ocurre en el de poniente.

Los valores de altura mínima, así como de alturas medias se mantienen con una mínima variación con respecto a los del escenario 1, no cumpliéndose lo mismo en los valores de altura de ola máxima, que sí que experimenta un descenso importante de prácticamente 50 cm de diferencia.

En cuanto a la forma de los histogramas, vuelve a darse aproximadamente el mismo efecto que en el escenario anterior.

El punto 1 describe un histograma de banda estrecha que experimenta un pico en los registros de entre 1,75 y 2,00 m, con una frecuencia máxima del 40 %, aunque no se puede despreciar los registros de entre 2,00 y 2,25 m que recogen un total del 36 % de las alturas de ola. A partir de ahí el histograma en el punto 2 y en el punto 3 tiende a desplazarse hacia la derecha registrando las mayores frecuencias en altura de ola mayores, aunque dichas frecuencias no superen en ningún caso el 36 %, síntoma de que se desplaza a alturas mayores, pero reduce el valor del pico.

A partir de ahí ocurre el mismo fenómeno que en el escenario 1, descendiendo las alturas de ola registradas y desplazándose el histograma hacia la izquierda donde se encuentran los valores de alturas de ola menores.

De este modo se entiende que el comportamiento de los resultados obtenidos a través del modelo, en cuanto a valores medios y extremos, al igual que los histogramas, comparten una férrea coincidencia con respecto a los simulados en el escenario 1.

Analizadas las alturas de ola, a continuación (Figura 97 - Figura 100), se muestran las rosas de oleaje de cada uno de los puntos de análisis, con el fin de tener una visión de la dirección predominante del oleaje en cada uno de los puntos y la vinculación que esta tiene con alturas mayores o menores.

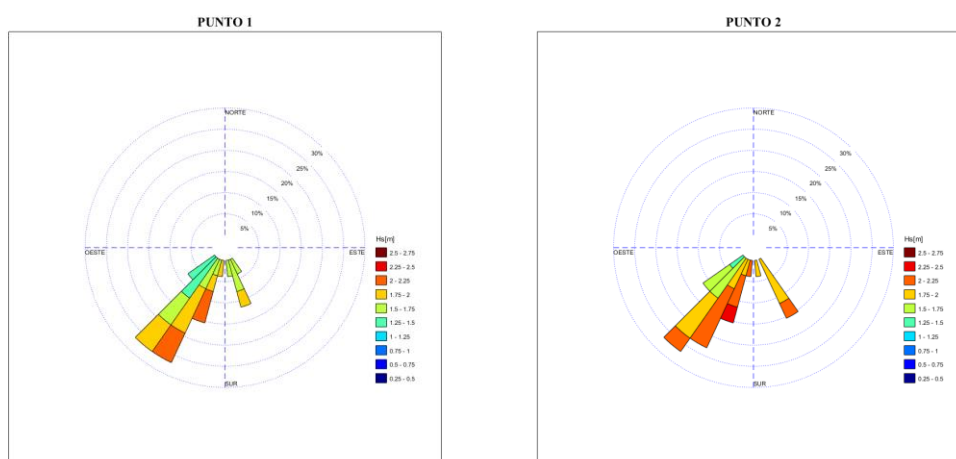


Figura 97 Rosa de oleaje en el Escenario 2 en los puntos 1 y 2

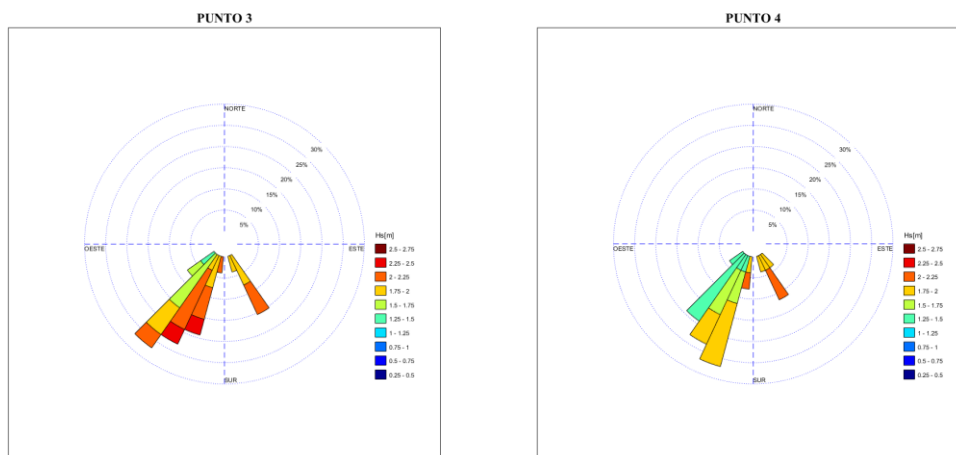


Figura 98 Rosa de oleaje en el Escenario 2 en los puntos 3 y 4

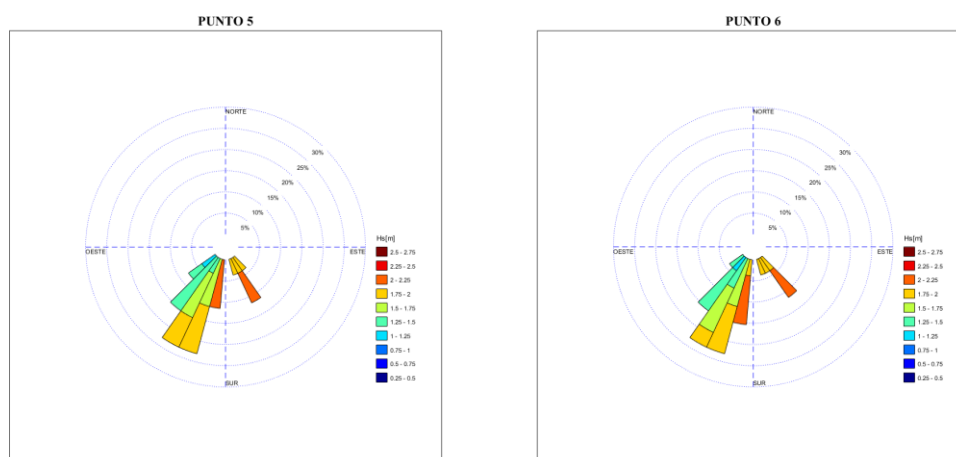


Figura 99 Rosa de oleaje en el Escenario 2 en los puntos 5 y 6

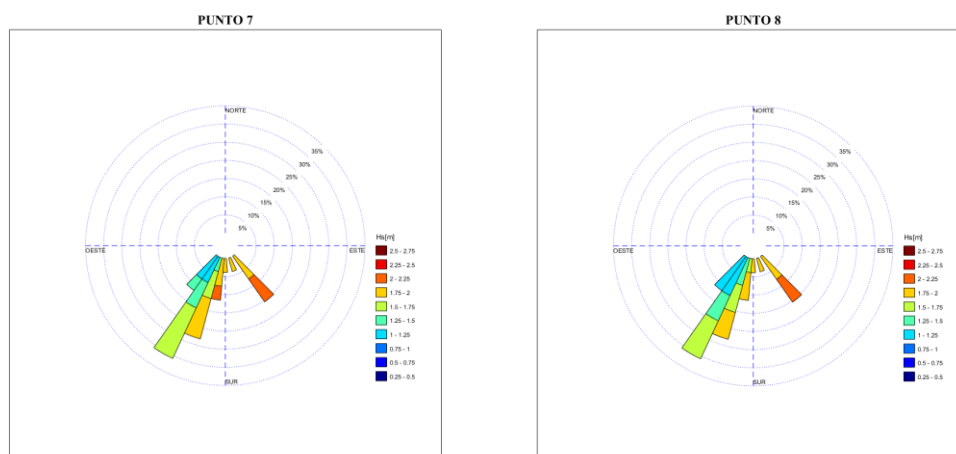


Figura 100 Rosa de oleaje en el Escenario 2 en los puntos 7 y 8

Se observa que, en cada uno de los puntos, los temporales registrados inciden en la costa con dos direcciones muy marcadas que son las del Sureste y el Suroeste, como ya ocurría en el escenario 1.

A su vez los temporales con incidencia desde el Suroeste son más frecuentes que los del Sureste. Aun así, los temporales del Sureste alcanzan valores superiores a los 1,75 m de altura de ola.

Al igual que ocurría en el escenario 1, hay que mencionar que la escala gráfica elegida para los puntos 7 y 8 son distintas aumentándose el porcentaje máximo de las rosas de oleaje hasta valores del 35 % mientras que el resto contemplan hasta el 30 %.

Por último, se realiza el ajuste del oleaje en cada uno de los puntos a través de una función de densidad de tipo Weibull y cuyas gráficas de la densidad de probabilidad de cada uno de los puntos se muestran a continuación (Figura 101 - Figura 104).

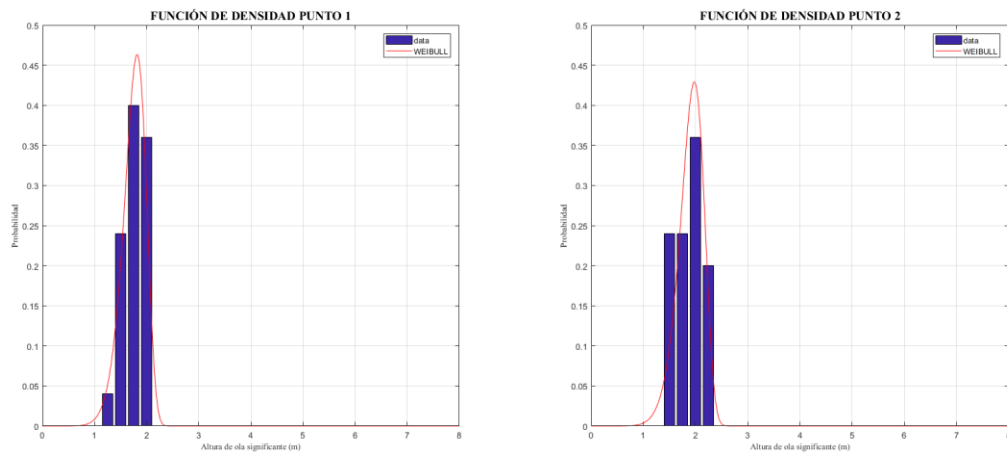


Figura 101 Función de densidad de probabilidad en el Escenario 2 en los puntos 1 y 2

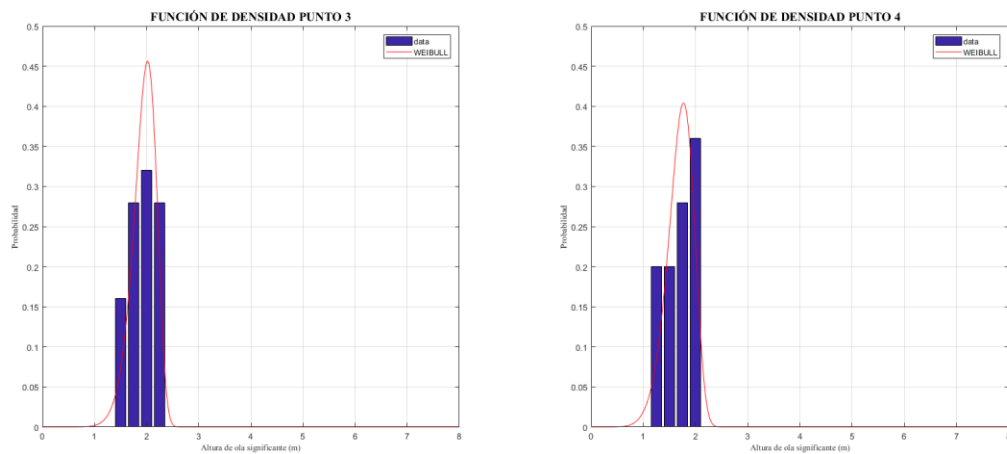


Figura 102 Función de densidad de probabilidad en el Escenario 2 en los puntos 3 y 4

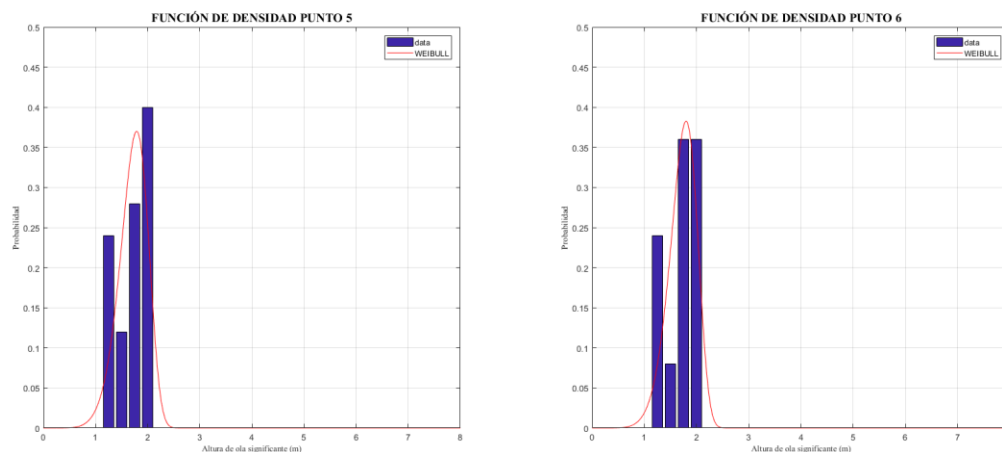


Figura 103 Función de densidad de probabilidad en el Escenario 2 en los puntos 5 y 6

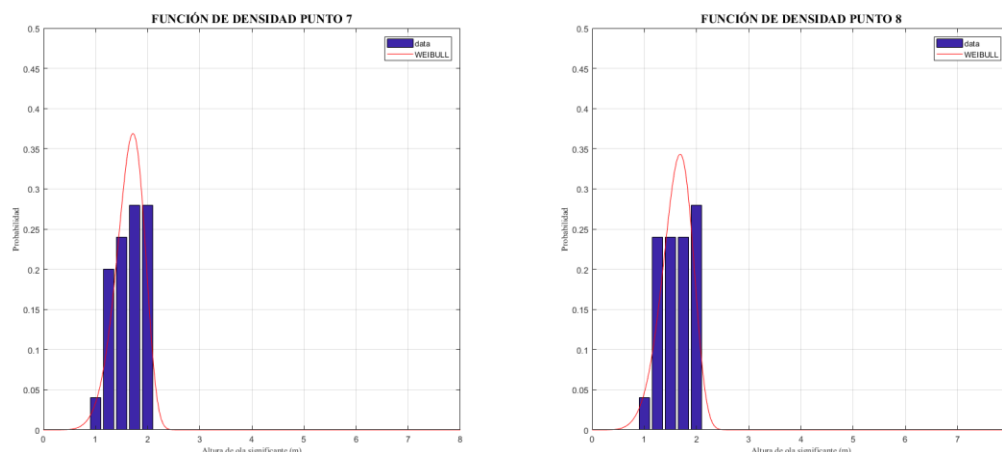


Figura 104 Función de densidad de probabilidad en el Escenario 2 en los puntos 7 y 8

Como ocurría con los histogramas, las funciones de densidad de probabilidad experimentan a medida que nos desplazamos desde el punto 1 al punto 8 una bajada del pico. También se observa una distribución de los registros de alturas de ola más ancha, lo que implica que aumenta la dispersión de los registros a lo largo que nos desplazamos hacia el Este, distribuyéndose el oleaje predominante de una forma más uniforme.

## 6.2 Obtención de los parámetros en rotura

Obtenido los valores de la propagación de cada uno de los estados de mar que se contemplan en cada uno de los escenarios, se pasa al cálculo de los valores de los parámetros que definen la rotura del oleaje en cada uno de los perfiles que se han considerado.

De este modo el procedimiento a seguir se basa en la comparación de los valores obtenidos a partir del modelo con una propagación lineal del oleaje como onda monocromática. Esta propagación calcula de forma simple y sencilla el oleaje como si de una única onda se tratase lo cual implica una sobrestimación de este.

En cuanto a la rotura el criterio que se toma es el correspondiente a la (6 – 1).

$$H_b = \gamma_b \cdot h \quad (6 - 1)$$

Siendo:

- $H_b$                       Altura de ola de rotura (m).
- $\gamma_b$                       Parámetros de rotura del oleaje.
- $h$                           Calado en el punto de rotura (m)

Para la obtención del valor correspondiente de cada uno de los parámetros de rotura, se han representado gráficamente los perfiles con la altura de ola obtenida a partir de la simulación, así como la altura de ola obtenida a través de la propagación lineal como onda monocromática.

El valor del parámetro de rotura se ha tomado como aquel que hace que la curva correspondiente a la altura de ola monocromática, corte a la altura de ola simulada en el punto donde esta experimenta un descenso brusco de su valor, entendiéndose que es el punto donde se produce la rotura.

Para conseguir un buen ajuste se prueba con varios coeficientes y se comprueba para varios estados si cumplen de forma correcta dicho ajuste hasta dar con el que mejor se aproxime.

En la Tabla 24 se muestran los valores correspondientes a los diferentes parámetros de rotura que han sido ajustados para cada uno de los perfiles, continuado de un ejemplo de un estado de mar en cada uno de los perfiles con el fin de ilustrar el perfil que adopta la playa en cada uno de ellos, así como el correcto ajuste de la rotura (Figura 105 - Figura 112).

PERFIL	$\gamma_b$
1	0,28
2	0,35
3	0,32
4	0,28
5	0,26
6	0,38
7	0,30
8	0,45

Tabla 24 Valores del parámetro de rotura en cada uno de los perfiles

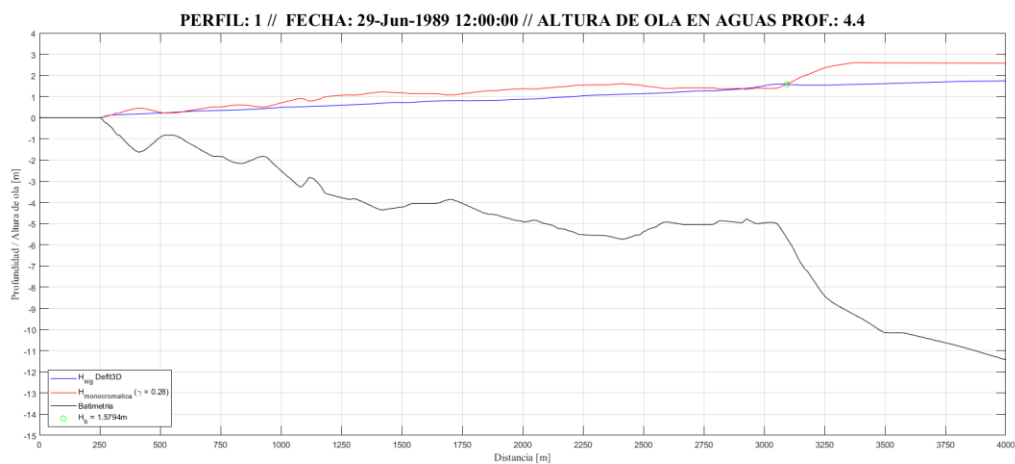


Figura 105 Perfil playa 29/Junio/1989 correspondiente al perfil 1

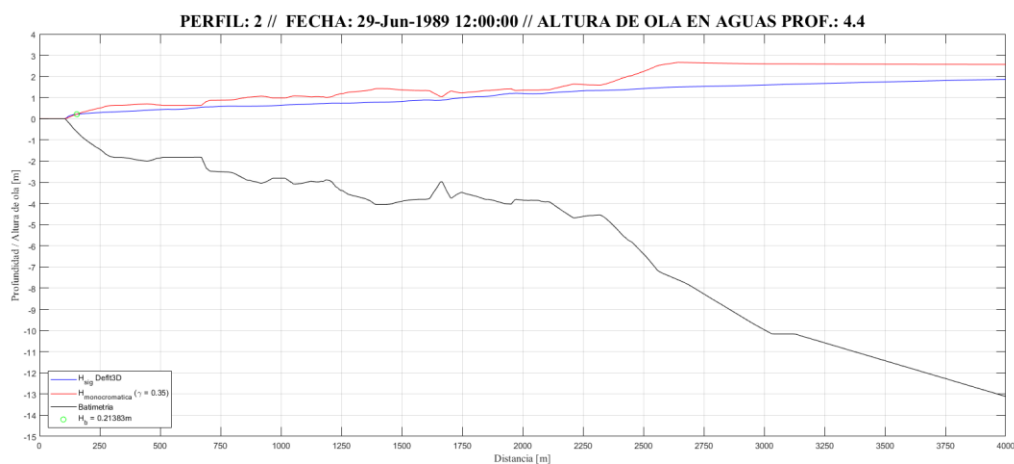


Figura 106 Perfil playa 29/Junio/1989 correspondiente al perfil 2

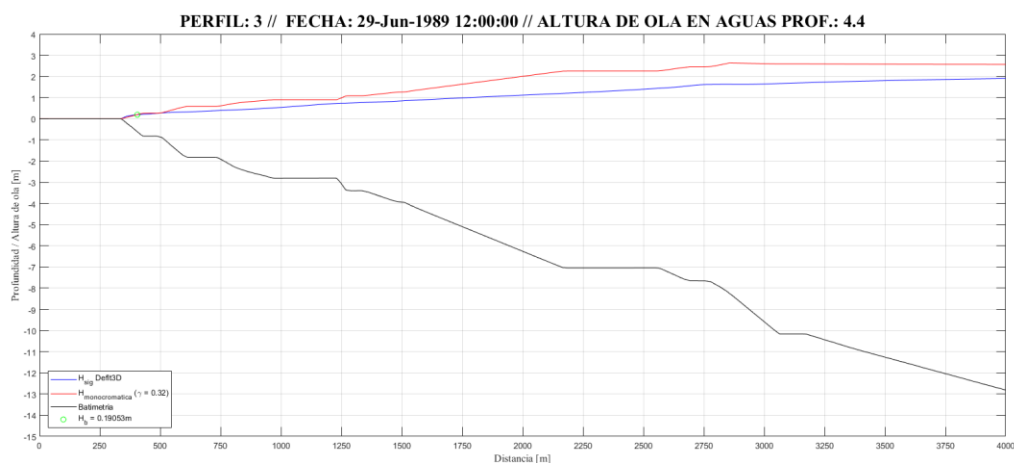


Figura 107 Perfil playa 29/Junio/1989 correspondiente al perfil 3

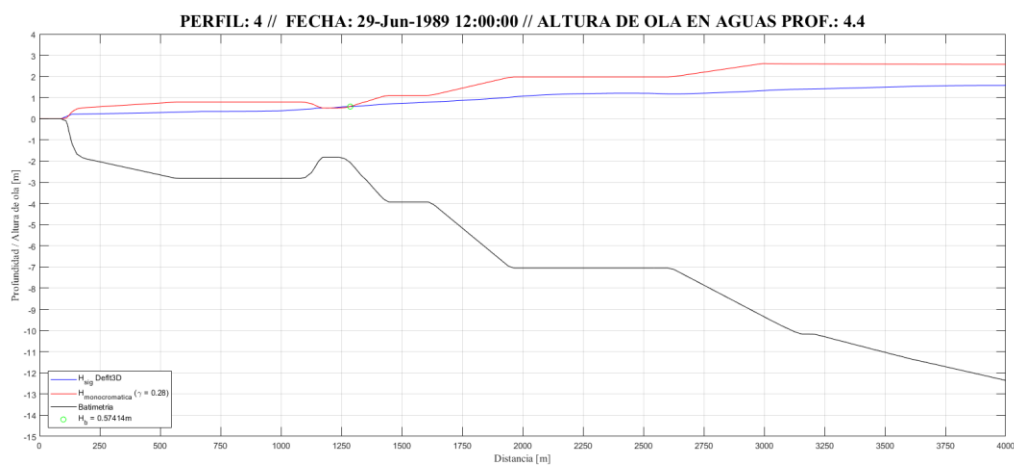


Figura 108 Perfil playa 29/Junio/1989 correspondiente al perfil 4



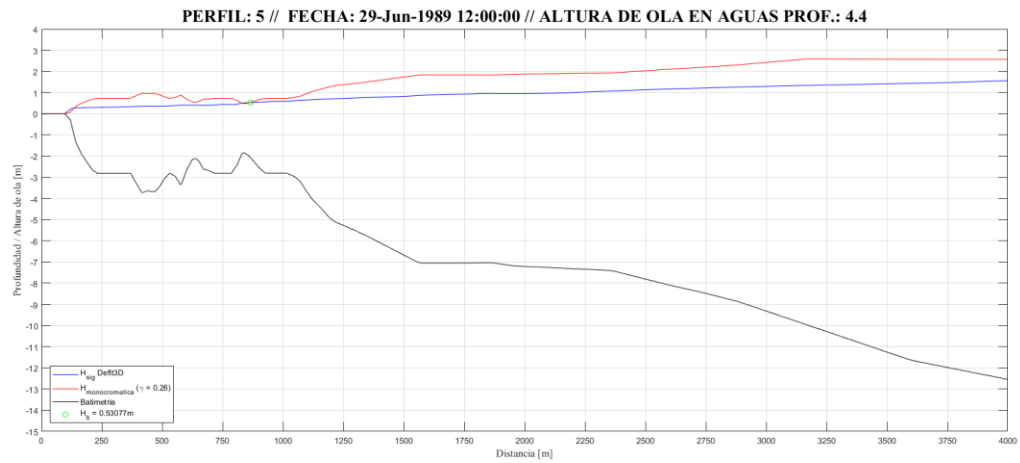


Figura 109 Perfil playa 29/Junio/1989 correspondiente al perfil 5

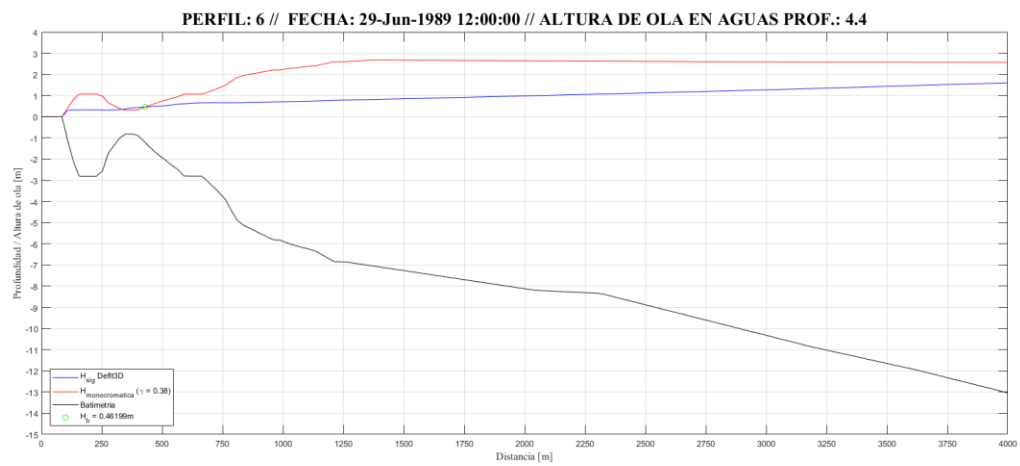


Figura 110 Perfil playa 29/Junio/1989 correspondiente al perfil 6

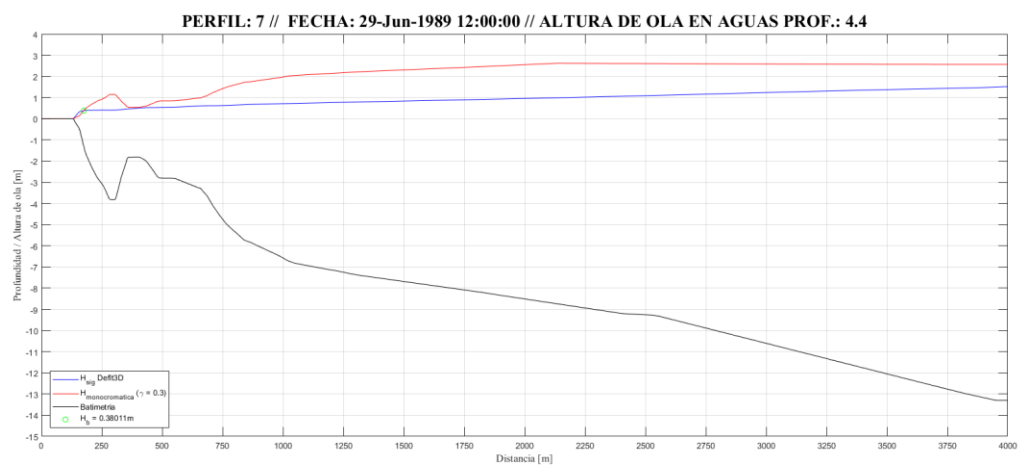


Figura 111 Perfil playa 29/Junio/1989 correspondiente al perfil 7

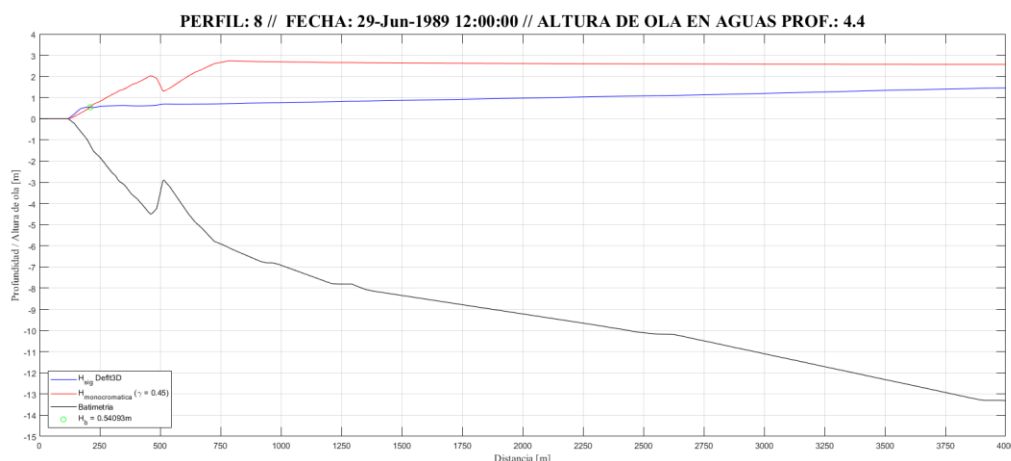


Figura 112 Perfil playa 29/Junio/1989 correspondiente al perfil 8

### 6.3 Transporte de sedimentos

Para el cálculo del transporte de sedimentos neto que se genera en cada uno de los perfiles, se ha utilizado la fórmula del CERC, la cual precisa de unos datos de entrada que han de ser calculados previamente.

Esta fórmula ofrece la capacidad de calcular el transporte longitudinal (paralelo a la costa) que se genera en un perfil determinado para una ola en rotura determinada.

La formulación a emplear es la descrita según las ecuaciones (3 – 4), (3 – 5) y (3 – 6) siendo los valores de las constantes los siguientes:

- $\rho$  Densidad del agua (1025 Kg/m<sup>3</sup>)
- $\rho_s$  Densidad del sedimento (2650 Kg/m<sup>3</sup>)
- $p$  Porosidad del sedimento (0,40)
- $g$  Gravedad (9,81 m/sg)

En la Tabla 25 se indican los valores característicos de cada una de las variables influyentes en el cálculo del transporte de sedimentos dependientes de cada uno de los perfiles.

PERFIL	$\gamma_b$	D <sub>50</sub>
1	0,28	0,50
2	0,35	0,42
3	0,32	0,90
4	0,28	0,35
5	0,26	0,35
6	0,38	0,35
7	0,30	0,35
8	0,45	0,35

Tabla 25 Valores de los parámetros para formulación del CERC de cada uno de los perfiles

Nótese que, a partir de la formula del CERC, el resultado que se obtiene del transporte longitudinal de sedimentos es aquel que viene provocado única y exclusivamente por el oleaje incidente. De este modo se abarca de forma correcta el objetivo y alcance fijado en este trabajo.

De igual modo, al estar calculando la tasa de transporte longitudinal de sedimentos a través de una serie temporal compuesta por unos estados correspondientes a un régimen extremal, proporciona veracidad a los resultados, ya que es en esos estados cuando verdaderamente el transporte de sedimentos en la playa es de realmente notorio.

### 6.3.3 Escenario 1: 1977 – 2009

Los resultados, dado el alto número de estados de mar, son representados en la Tabla 26 a través de los valores extremos y en la Figura 113, las curvas correspondientes a cada uno de los estados que se han calculado (recordamos que en este escenario sumaban un total de 106 estados).

PERFIL	DIRECCIÓN OESTE – ESTE			DIRECCIÓN ESTE – OESTE		
	$Q_{med} (m^3/s)$	$Q_{min} (m^3/s)$	$Q_{max} (m^3/s)$	$Q_{med} (m^3/s)$	$Q_{min} (m^3/s)$	$Q_{max} (m^3/s)$
1	0,2660	0,0004	0,4972	-0,3194	-0,0006	-0,6389
2	0,0300	0,0002	0,4236	-0,1095	-0,0012	-0,6960
3	0,0087	-	0,1691	-0,0016	-0,0001	-0,0068
4	0,0439	0,0046	0,3798	-0,1104	-0,0193	-0,2249
5	0,0186	-	0,3526	-0,0794	-	-0,2990
6	0,0113	0,0001	0,3080	-0,0537	-	-0,1352
7	0,0098	-	0,2231	-0,0683	-0,0004	-0,2363
8	0,0227	0,0049	0,1784	-0,0311	-0,0094	-0,0603

Tabla 26 Tasa de sedimentación para distintas direcciones en los perfiles en el Escenario 1

Para el análisis del transporte, se toma como criterio de signos el correspondiente a un flujo positivo aquel que se desplaza en dirección Oeste – Este y negativo el contrario.

Hay que destacar que, para una correcta aplicación del criterio de signos adoptado, los valores de la dirección de rotura del oleaje en cada estado y cada perfil se toman como el ángulo con respecto a la perpendicular a la línea de costa (perfil), no coincidiendo por tanto con su acimut.

De este modo, tomando los resultados máximos de la Tabla 26 se observa cómo tanto el transporte de sedimentos en dirección Este – Oeste (oleaje del Sureste) como el Oeste – Este (Suroeste) provocan un transporte longitudinal máximo y mínimo del mismo orden de magnitud. Esto deriva de que las alturas de ola de las tormentas registradas en cada dirección tienen unos valores de altura de ola en rotura muy similares y forman un ángulo con la línea de costa prácticamente simétrico.

En cuanto a valores mínimos, los valores que se obtienen son nulos o prácticamente nulos. Como excepción, los perfiles 4 y 7 experimentan unos valores un tanto mayores llegando a superar los  $0,004 m^3/sg$  en los oleajes del Oeste y rondando los  $0,001 m^3/sg$  en los del Este.

Se muestra en la Figura 113 la representación, ajustada mediante spline, de la variación que se produce entre los diferentes perfiles del modelo en relación con su tasa de transporte longitudinal neto de sedimentos.

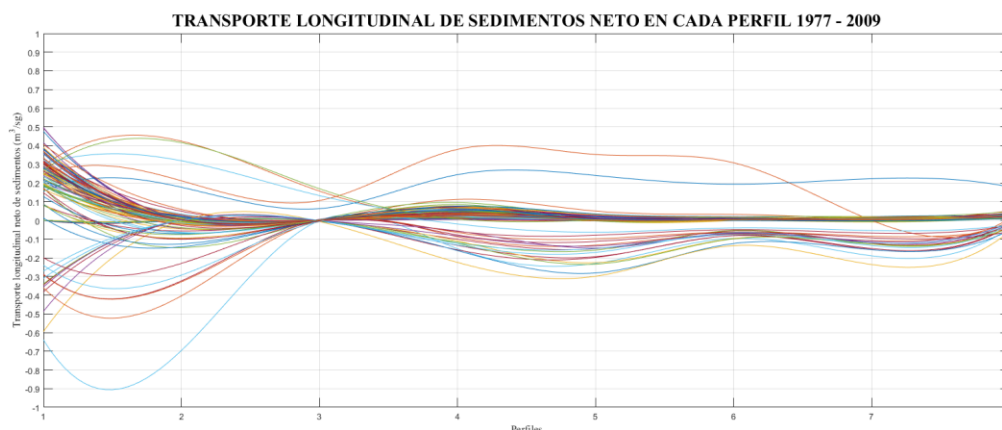


Figura 113 Valores de la tasa de sedimentación longitudinal en el Escenario 1

Como se observa en la gráfica, en la zona de la desembocadura se genera un abanico muy grande, oscilando los valores extremos entre los  $\pm 0,60$  m<sup>3</sup>/sg. Dichos valores son excesivamente altos posiblemente derivado de que zona de rotura es extensa y por tanto el transporte se genera en una longitud mayor que el resto de los perfiles.

De igual modo sucede en esa primera zona de análisis es la zona de la desembocadura del río Guadiana, en la que afectaría de forma directa el aporte de sedimentos del propio río, que hace que los valores obtenidos de única y exclusivamente por la acción del oleaje puedan no ajustarse lo suficiente a la realidad.

Por otro lado, es digno de destacar el punto de inflexión que se produce en el perfil 3, coincidente con el tómbolo de poniente, donde el transporte de sedimentos pasa a ser completamente nulo en la mayoría de los casos.

A partir de esa zona se observa la mayoría de los estados de mar representado fluyen con curvas prácticamente paralelas en el caso de los valores positivos, próximos al cero. No es así con los valores negativos que describen una doble curvatura con dos mínimos (o máximos si hablamos en valores absolutos) cercanos a los perfiles 5 y 7, siendo el primero de mayor intensidad que el segundo.

#### 6.3.4 Escenario 2: 2009 – 2015

Al igual que se ha desarrollado en el escenario 1, en el escenario 2 se ha calculado a través de la formulación del CERC los valores de la tasa de transporte longitudinal neto de cada uno de los 8 perfiles propuesto, aunque esta vez con los valores de los temporales correspondientes entre el año 2009 y 2015.

En la Tabla 27 se muestran los valores máximos, mínimo y medios correspondientes a cada dirección de transporte que se han obtenido para el periodo temporal fijado por este escenario.

PERFIL	DIRECCIÓN OESTE – ESTE			DIRECCIÓN ESTE – OESTE		
	$Q_{med}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{min}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{max}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{med}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{min}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{max}$ (m <sup>3</sup> /s)
1	0,2486	0,0061	0,4196	-0,2932	-0,2400	-0,3715
2	0,0646	0,0007	0,4960	-0,1310	-0,0043	-0,3350
3	0,0191	0,0001	0,1856	-0,0025	-	-0,0072
4	0,0570	0,0063	0,3183	-0,0709	-0,0080	-0,1231
5	0,0198	0,0003	0,1144	-0,0478	-0,0001	-0,1626
6	0,0104	0,0005	0,0938	-0,0394	-0,0002	-0,0620
7	0,0132	0,0010	0,1062	-0,0523	-0,0005	-0,1271
8	0,0244	0,0072	0,0878	-0,0287	-0,0186	-0,0398

Tabla 27 Tasa de sedimentación para distintas direcciones en los perfiles en el Escenario 2

Recuérdese que el criterio de signos considera positivo para el transporte dirección Este y negativo, al contrario.

De este modo, al analizar los datos de la capacidad máxima de transporte de cada una de las direcciones se observa como describen una forma bastante pareja, a excepción del perfil 3 donde el transporte en dirección Este – Oeste es prácticamente nulo, igual que ocurría en el escenario 1. En cuanto a los valores sí que se comprueba que, aunque por poca diferencia el oleaje proveniente del Suroeste tiene de una mayor capacidad de transporte que su simétrico.

En cuanto a los valores mínimos son prácticamente iguales a los que se obtuvieron en el escenario 1 a excepción del perfil 1, donde se observa un pico en la tasa con dirección Este – Oeste.

Por último, los valores medios se mantienen prácticamente paralelos, aunque estando un poco por encima en valores absolutos el transporte hacia el Oeste.

Se muestra en la Figura 114 la representación, ajustada mediante spline, de la variación que se produce entre los diferentes perfiles del modelo en relación con su tasa de transporte longitudinal neto de sedimentos.

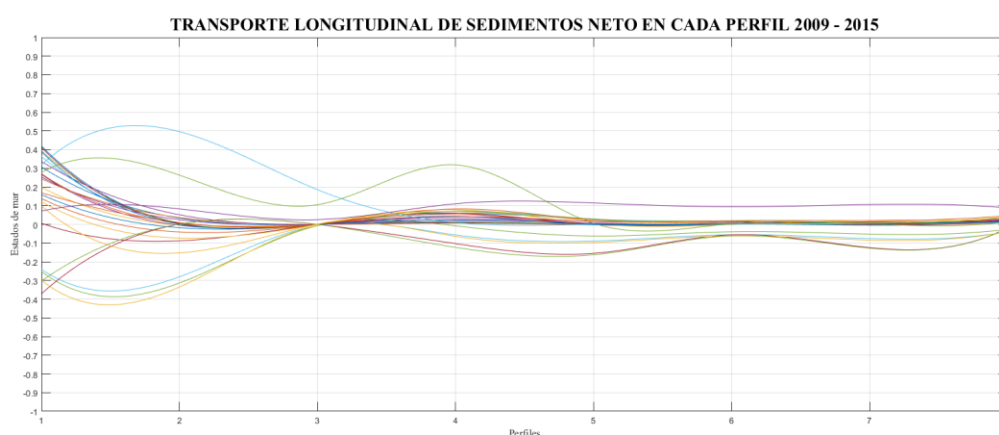


Figura 114 Valores de la tasa de sedimentación longitudinal en el Escenario 2

Al igual que ocurría con la propagación del oleaje y con los valores extremos, las gráficas del transporte de sedimentos también se asimilaran mucho en los dos escenarios en cuanto a su forma se refiere.

De este modo se observa cómo, son los dos perfiles más cercanos a la desembocadura los cuales experimentan una tasa de transporte mucho mayor en ambas direcciones.

Es el perfil 3, coincidente con el tómbolo de poniente, el que tiene una menor tasa. Este punto además continúa siendo un punto de inflexión donde prácticamente para todos los estados de mar la tasa de transporte es nula.

Hay que tener en cuenta que en este escenario tampoco se ha contemplado la tasa de aportación de sedimentos que ofrece el río en la desembocadura.

En cuanto al resto de perfiles la forma es muy similar a las ofrecidas por el escenario 1, apareciendo dos picos en la dirección Este – Oeste en los perfiles 5 y 7 y estando próximos a cero en dirección contraria.

## 6.4 Gradiente de sedimentación

Dado que el transporte longitudinal neto en un perfil cualquiera no ofrece toda la información necesaria y suficiente para poder definir el estado morfodinámico de una playa, resulta necesario calcular el incremento de dicho flujo longitudinal de sedimentos entre dos perfiles contiguos generando de ese modo un dominio cerrado en el cual se hace un balance de masas.

Dicha diferencia por tanto de ser positiva implicaría que en el dominio generado entra más material que sale y que la playa estaría en un proceso de sedimentación. En su defecto, si dicha diferencia fuera negativa sería del caso contrario en el cual estaría entrando menos material del que precisa salir y por tanto la línea de costa en ese punto estaría retrocediendo al producirse la erosión de la playa.

A continuación, se pasa a calcular dichas diferencias entre cada uno de los perfiles para cada escenario propuesto.

#### 6.4.5 Escenario 1: 1977 – 2009

Se calculan y se exponen en la Tabla 28 los valores máximos, mínimos, la media, así como el valor total acumulado a lo largo de los 32 años analizados (entre 1977 y 2009) de la erosión o sedimentación de cada una de las zonas limitadas por dos perfiles contiguos.

Al igual que se hizo con las tasas de los perfiles dividiéndose en las dos direcciones posibles, se ha dividido en función del signo, esta vez correspondiendo con la sedimentación todos aquellos valores positivos y con erosión aquellos negativos.

Se calcula a su vez el estado en que se encuentra finalmente cada uno de los tramos al final del escenario haciéndose un balance a través del acumulado de la pérdida de sedimento o la ganancia que se ha dado en el periodo calculado.

TRAMO	PERFILES	SEDIMENTACIÓN			EROSIÓN			$\Delta Q_{\text{acumulado}}$ (m <sup>3</sup> /s)
		$\Delta Q_{\text{medio}}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta Q_{\text{min}}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta Q_{\text{max}}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta Q_{\text{medio}}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta Q_{\text{min}}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta Q_{\text{max}}$ (m <sup>3</sup> /s)	
1	1 – 2	0,2660	0,0004	0,4972	-0,3194	-0,0006	-0,6389	-20,4820
2	2 – 3	0,0300	0,0002	0,4236	-0,1095	-0,0012	-0,6960	2,0353
3	3 – 4	0,0087	-	0,1691	-0,0016	-0,0001	-0,0068	1,2750
4	4 – 5	0,0439	0,0046	0,3798	-0,1104	-0,0193	-0,2249	-3,7549
5	5 – 6	0,0186	-	0,3526	-0,0794	-	-0,2990	1,3566
6	6 – 7	0,0113	0,0001	0,3080	-0,0537	-	-0,1352	-1,1254
7	7 – 8	0,0098	-	0,2231	-0,0683	-0,0004	-0,2363	3,0659

Tabla 28 Valores de la erosión/sedimentación entre cada uno de los perfiles en el Escenario 1

Se muestran los resultados de forma gráfica en la Figura 115 para una mejor percepción de las tendencias y similitudes. Se presentan los resultados en valor absoluto.

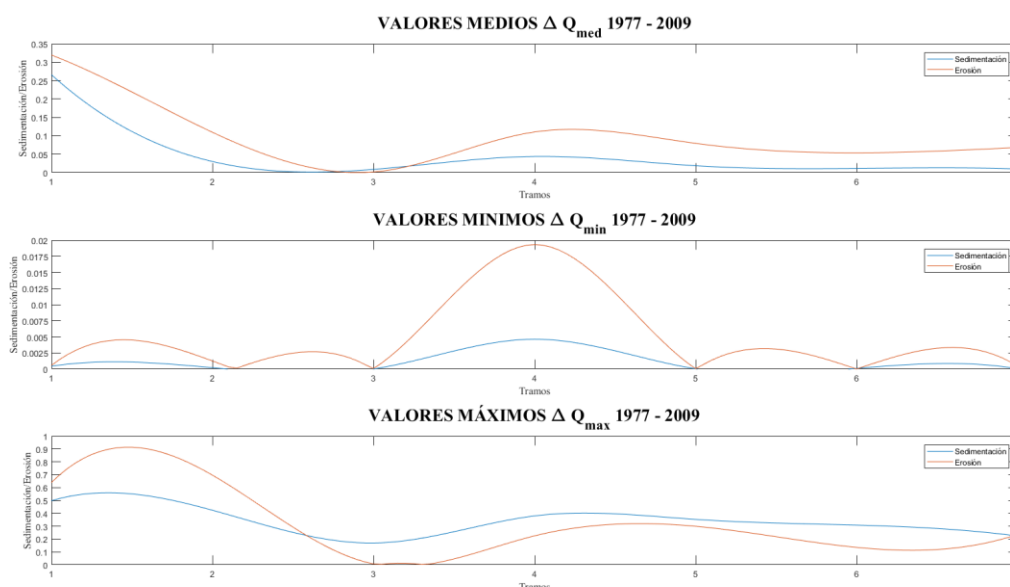


Figura 115 Representación de los valores extremos de sedimentación/erosión en el Escenario 2

En cuanto a los resultados obtenidos, se observa que los valores medios de la totalidad de los tramos a excepción del tramo 3, son mayores en cuanto a erosión que sedimentación.

Los valores mínimos, se observa como prácticamente nos encontramos ante una distribución simétrica, en la cual los valores de los perfiles de los extremos son prácticamente nulos. Por el contrario, en el tramo 4 se forma un pico con valores que alcanzan más de 0,20 m<sup>3</sup>/sg de déficit, quedándose los valores de sedimentación en una cuarta parte.

Los valores máximos, los resultados marcan un punto de inflexión con un cambio de tendencia en el tramo 3, aspecto similar al que ocurría en las tasas por perfiles. De este modo se observa como en los dos primeros tramos (entre el perfil 1 y el perfil 3), los valores máximos de sedimentación superan a los de erosión. A partir de dicho punto se invierte la tendencia y pasan a ser los valores máximos de erosión superiores a los de sedimentación. En el último tramo (tramo 7) acaban prácticamente igualados.

Los valores acumulados, lo que se hace es la suma total de cada uno de los estados de mar simulados y se comprueba en cómputo general que evolución y tendencia a lo largo del escenario temporal ha tenido la costa.

De este modo se observa que la zona más cercana a la desembocadura del Guadiana, a expensas de incorporar los sedimentos que el propio río aportaría, sufre una alta tasa de erosión provocada posiblemente por la refracción del oleaje y la incidencia de este con componentes del Sureste en muchos estados de mar, alterando la dirección natural del mismo.

A partir de ahí se comprueba como se van alternando zonas de erosión y sedimentación a medida que nos desplazamos hacia el Este, destacando las zonas de sedimentación coincidentes con los dos tómbolos que se producen en la zona (tanto el tómbolo de poniente como el de levante y con la zona de Punta del Moral, donde el espigón favorece dicho proceso y por tanto la acumulación de sedimentos es notable.

En cuanto a la erosión se comprueba que es a los márgenes de los tómbolos donde se produce el fenómeno, debido principalmente a la atracción de sedimentos que estos producen, así como la refracción del oleaje.

Expuestos los valores extremos, medios y globales en la Figura 116 se muestra a través de un esquema de colores todas las tasas de erosión calculadas para cada uno de los estados de mar, de modo que se ofrezca un resumen general de la tendencia de la playa.

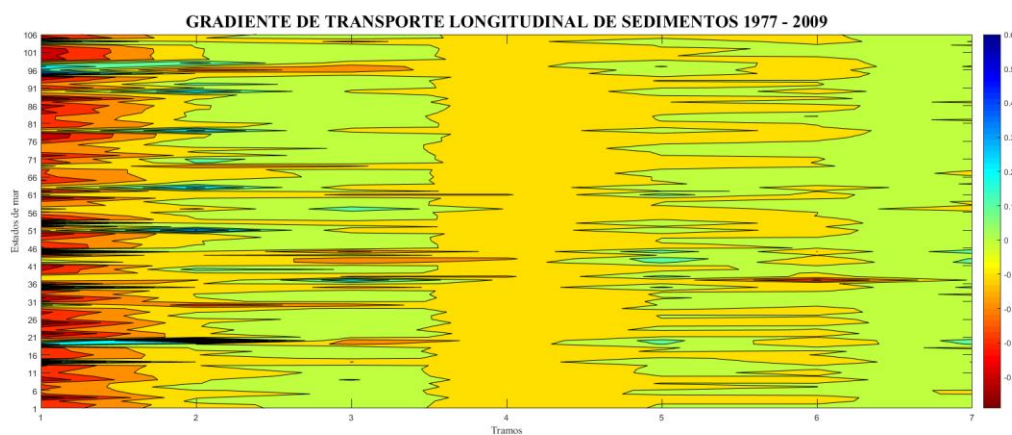


Figura 116 Tasa de erosión por tramos en el Escenario 1 (unidades de m<sup>3</sup>/sg)

Como se comprueba en la Figura 116, la tendencia es la que ya se ha explicado anteriormente basándose en dos zonas con tasas de erosión importantes (zona de San Bruno y la zona entre los tómbolos), y tres zonas de tasas altas de sedimentación correspondientes con los dos tómbolos de la costa y con la zona de Punta del Moral.

Se da también entre el tómbolo de levante y el espigón de Punta del Moral, una zona que se encuentra también en erosión, pero sin alcanzar los altos valores de San Bruno o la zona entre tómbolos.

#### 6.4.6 Escenario 2: 2009 – 2015

Al igual que se ha hecho en el escenario 1, se muestran ahora los resultados de la tasa de erosión correspondiente a los 6 años contemplados por el escenario 2 entre los años 2009 y 2015.

Primero de todo, se muestra en la Tabla 29 un resumen de los valores extremos (máximos y mínimos) así como los valores medio y los acumulados para cada uno de los tramos para cada estado de erosión o sedimentación.

TRAMO	PERFILES	SEDIMENTACIÓN			EROSIÓN			$\Delta Q_{\text{acumulado}}$ (m <sup>3</sup> /s)
		$\Delta Q_{\text{medio}}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta Q_{\text{min}}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta Q_{\text{max}}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta Q_{\text{medio}}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta Q_{\text{min}}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta Q_{\text{max}}$ (m <sup>3</sup> /s)	
1	1 – 2	0,2486	0,0061	0,4196	-0,2932	-0,2400	-0,3715	-4,0316
2	2 – 3	0,0646	0,0007	0,4960	-0,1310	-0,0043	-0,3350	0,5794
3	3 – 4	0,0191	0,0001	0,1856	-0,0025	0,0000	-0,0072	0,5390
4	4 – 5	0,0570	0,0063	0,3183	-0,0709	-0,0080	-0,1231	-1,1374
5	5 – 6	0,0198	0,0003	0,1144	-0,0478	-0,0001	-0,1626	0,2172
6	6 – 7	0,0104	0,0005	0,0938	-0,0394	-0,0002	-0,0620	-0,1677
7	7 – 8	0,0132	0,0010	0,1062	-0,0523	-0,0005	-0,1271	0,6146

Tabla 29 Déficit o superávit de transporte longitudinal entre cada uno de los perfiles en el Escenario 2

Se muestran los resultados de forma gráfica en la Figura 117 para una mejor percepción de las tendencias y similitudes. Se presentan los resultados en valor absoluto.

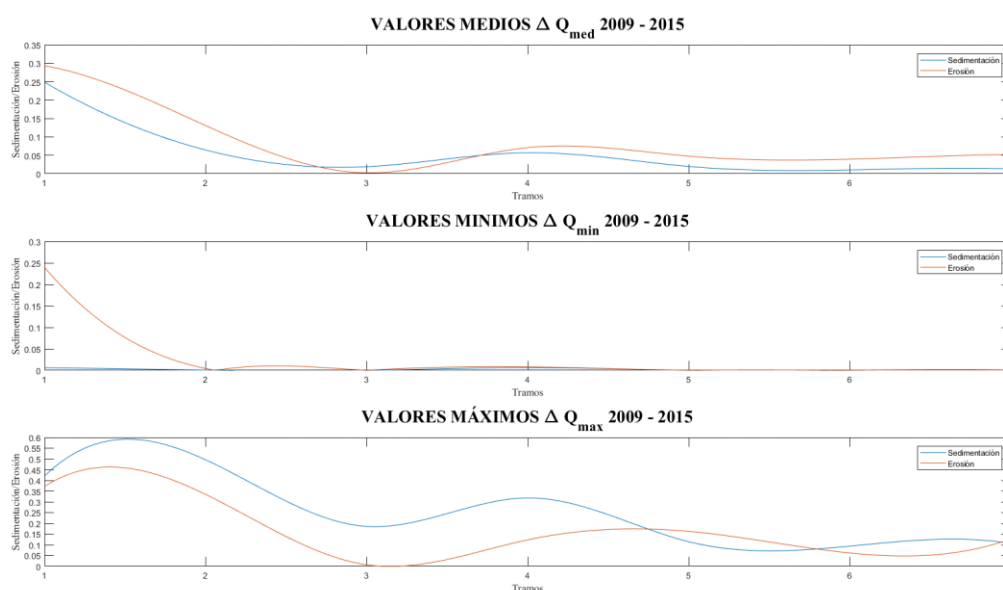


Figura 117 Representación de los valores extremos de sedimentación/erosión en el Escenario 2

De este modo se comprueba como los valores medios son muy parecidos a los obtenidos en el escenario 1, tanto en forma como en valores absolutos.

En cuanto a los valores mínimos, la simetría que antes ofrecían se pierde ahora a merced de la existencia de un gran pico de erosión producido en la zona de San Bruno. En el resto de los perfiles se sigue manteniendo la tendencia observándose un pico al igual que antes en el tramo 4, aunque esta vez más suave alcanzando valores entre los 0,006 m<sup>3</sup>/sg en sedimentación (del orden de la mitad que en el escenario 1) y 0,008 m<sup>3</sup>/sg en erosión.

Los valores máximos por su parte mantienen la misma tendencia y valores similares, aunque algo más bajos tanto en erosión como en sedimentación, a excepción de los tramos 2 y 3 (entre los perfiles 2 – 4), donde los valores de sedimentación de este escenario se superan alcanzando valores de casi 0,50 m<sup>3</sup>/sg.



Por último, se han obtenido también las tasas acumuladas de cada uno de los perfiles a lo largo de los 6 años, repitiéndose la misma tendencia que ocurría en el escenario 1.

En la Figura 118 se muestra el mapa de colores de los estados calculados en este escenario.

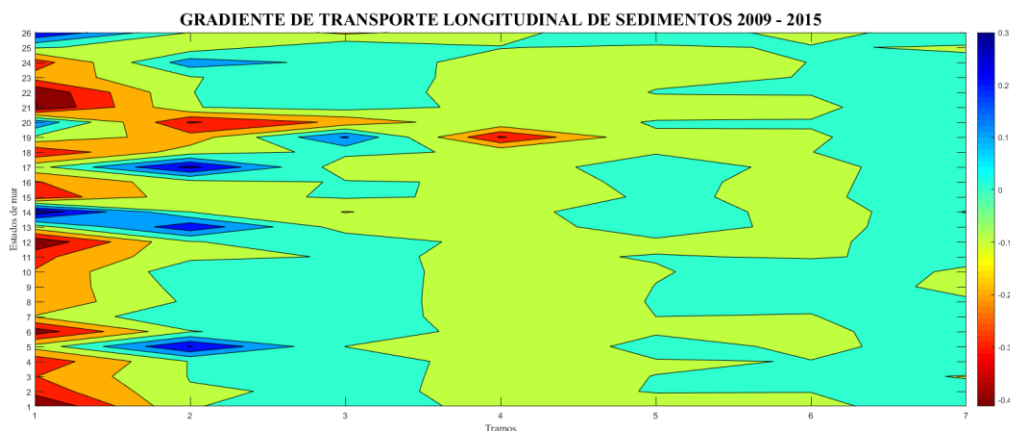


Figura 118 Esquema de erosión sedimentación por tramos en el Escenario 2 (unidades de  $m^3/sg$ )

Nótese que, dado que se cuenta con un menor número de tormentas, por lo que las tendencias son menos intuitivas que en el escenario anterior.

Aun así, se puede comprobar como la tendencia que sigue la playa es muy parecida a lo que se observaba en el escenario 1 alternándose las zonas de sedimentación asociadas a los dos tómbolos y a la contención de sedimentos que ofrece el espigón de Punta del Moral, con zonas de altas tasas de erosión.



# 7 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

---

El procedimiento que se va a seguir en el presente capítulo, una vez expuestos los valores objetivos de los resultados en el anterior capítulo, está basado en desarrollar un análisis capaz de sintetizar, resumir e ilustrar de una forma más manejable y admisible esos resultados.

Para ellos primero de todo se desarrollará una primera comparativa entre los resultados facilitados por parte de la Junta de Andalucía a través del portal web de REDIAM con los resultados que se han obtenido en el escenario 1, coincidentes ambos en el mismo periodo temporal.

Los datos que ofrece REDIAM están calculados a partir del estudio del movimiento de la línea de costa a partir de ortofotografías de la zona.

Comparados ambos resultados, se compara en una segunda instancia los valores que se obtienen de la tasa de erosión en el escenario 1 con los que se obtienen en el escenario 2, de modo que se obtenga un patrón general del estado de la costa como cómputo general de ambos.

## 7.1 Comparación con REDIAM

La Red de Información de Andalucía (REDIAM) dispone de un servicio de cartografía (KML) accesible mediante un visor online mediante el cual se muestra una clasificación de la zona costera andaluza según el punto de vista de la vulnerabilidad de esta frente a los temporales.

Basada en una serie temporal que abarca desde el año 1977 hasta el año 2009, analiza la costa cada 50 m a través de las ortofotos existentes de esos dos años comprobando las diferencias en planta.

Los datos son representados mediante puntos de tamaño proporcional al valor de la tasa en cada caso (expresada en m lineales) y son distribuidos a lo largo de una línea uniforme situada, para facilitar la lectura del mapa, a una distancia aproximada de 900m. de la línea de costa hacia el mar (Junta de Andalucía, 2010).

Si tomamos como referencia los valores que ofrece REDIAM, podemos caracterizar la zona de estudio según las siguientes partes.

- Zona de la desembocadura: Se trata de la zona más occidental de la playa de Isla Canela y alterna zonas de sedimentación, posiblemente fomentada a partir de los sedimentos que aporta el propio río, con otras de erosión.
- Zona del tómbolo de poniente: Zona de sedimentación que según valores de REDIAM incluye algún punto en equilibrio estático en la cual se ha formado un tómbolo claramente visible a través de ortofotografías.
- Zona de protección de la costa: Posiblemente según REDIAM la zona con un mayor índice de erosión y por ello también zona que tiene protegida su línea de costa a través de una contención a base de escollera.
- Punta del Moral: Debido fundamentalmente a la influencia del espigón que lleva su nombre, la zona de Punta del Moral es la zona más oriental de Isla Canela y según los datos ofrecidos por REDIAM se trata de una zona con valores elevados de sedimentación.

Para la caracterización de la tasa de erosión, REDIAM utiliza dos parámetros que se enuncian y describen a continuación:

- Tasa de cambio: La tasa de cambio anual es el fruto de la división entre la diferencia real medida según ortofotos entre dos líneas de costa dividida por el número de años que separan dichas ortofotos.
- Movimiento de la línea de costa: en valores absolutos se representa el movimiento sufrido en la línea de costa que ha sido utilizado para la tasa de cambio.

Para la comparativa entre el escenario 1 y los valores de REDIAM, se ha interpolado los resultados de la tasa anual acumulada de cada uno de los siete tramos a través de una función polinómica convirtiendo la tasa de erosión en una variable continua a lo largo de la costa.

Obtenida dicha variación se representa de forma gráfica en la misma ortofotografía que facilita REDIAM. Se facilita así la comparación de ambos resultados.

Se expone en la Figura 119 la superposición de los datos de REDIAM y los calculado en este trabajo.



*Figura 119 Comparación de la tasa de erosión en Isla Canela según REDIAM y Escenario 1*

Como se puede comprobar, los resultados obtenidos por el método de propagación del oleaje a través de la formulación del CERC, ofrecen una solución algo distinta a la que ofrece el servicio REDIAM.

En cuanto a la zona de San Bruno, el oleaje incidente en la costa a lo largo del escenario 1, provoca que se produzcan altas tasas de erosión en la zona, al igual que ocurre según el modelo de REDIAM. Tanto es así, que la frontera que existe entre la zona de erosión y sedimentación coinciden prácticamente según ambos modelos.

De igual modo ocurre en la zona del tómbolo de poniente y la zona entre los tómbolos donde tanto REDIAM como en el escenario 1 de este trabajo coinciden en cuanto a la caracterización de las zonas de sedimentación y erosión.

En cambio, es en la zona de levante (Haraganes y Punta del Moral) donde se observan mayores diferencias. Los valores que ofrece REDIAM indican que, tras la zona de erosión, coincidente con la zona entre el tómbolo de poniente y el de levante, hasta llegar al espigón de Punta del Moral, se encuentran en un estado de sedimentación en su totalidad.

Los resultados que se obtienen de la influencia del oleaje en esa zona en cambio ofrecen unos valores algo más ajustados. Según los valores obtenidos en el escenario 1, entre las zonas de sedimentación que se dan en el tómbolo de levante y en la zona del espigón, existe una zona que se encuentra en erosión, dentro de la playa de los Haraganes.

Este esquema proporciona una mejor explicación de la formación de los dos tómbolos, ya que estos se producen nutriéndose de sedimentos que migran de zonas colindantes, haciendo que tenga cierta lógica que ambas zonas se encuentre rodeadas de otras zonas en erosión.

## 7.2 Comparación Escenario 1 y Escenario 2

Una vez comparado el escenario 1 con los datos facilitados por REDIAM, se pasa a analizar cómo evoluciona la playa desde el año 2009 hasta 2015 comparándose el escenario 2 con el escenario 1. Esta comparación se justifica con el fin de observar si la dinámica de la costa ha variado en esos años o si de lo contrario se mantiene con valores similares a los del escenario 1.

Dado que ambos escenarios están referidos a regímenes extremales recogidos a través de un mismo punto SIMAR, deberían ofrecer resultados similares que ofrezcan una visión final única de los procesos que se dan a cabo en la playa de Isla Canela.

Las variables que se pasan a comparar serán las que se indican a continuación.

- Clima marítimo a través de la propagación del oleaje mediante alturas de ola y direcciones registradas en cada uno de los ocho puntos de control que se utilizaron para su cálculo.
- Sedimentación/Erosión de la costa a través de los valores obtenidos para cada tramo comprendido entre perfiles.

### 7.2.1 Propagación del oleaje

La propagación del oleaje se ha desarrollado para ambos escenarios haciendo uso del mismo modelo por lo que los parámetros de calibración usados han sido en todo momento los mismos.

Para la comparación de ambas propagaciones lo que se hace es un estudio de cómo son las olas que llegan a los puntos de control en uno y otro escenario siempre desde un punto de vista estadístico. Para ello se desarrolla un análisis basado en las dos variables más significativas que definen a un oleaje (obviando el periodo en este caso) que son la altura de ola significativa y la dirección.

De este modo se analizarán y se enfrentarán los resultados de uno y otro escenario en cada punto a través de histogramas de frecuencias que permitan hacer un análisis más visual.

#### 7.2.1.1 Alturas de ola

Para la comparación de los dos escenarios con respecto a esta variable lo que se propone es un análisis con respecto a la forma de los histogramas en cada punto, así como un análisis de los valores extremales (máximos y mínimos) y medios.

De este modo entre la Figura 120 y la Figura 127 se ofrecen los ocho histogramas de cada punto donde se han juntado los valores correspondientes al escenario 1 y al escenario 2 de modo que la comparativa visual sea inmediata.

El hecho de tomar los histogramas en vez de directamente el registro de cada uno de los estados viene fundamentado en los tamaños de la muestra de cada uno de los escenarios ya que contamos en un primer lugar con 106 estados de mar y en segundo lugar con 26. De este modo se trabajará con valores relativos en todo momento consiguiendo así la objetividad buscada.

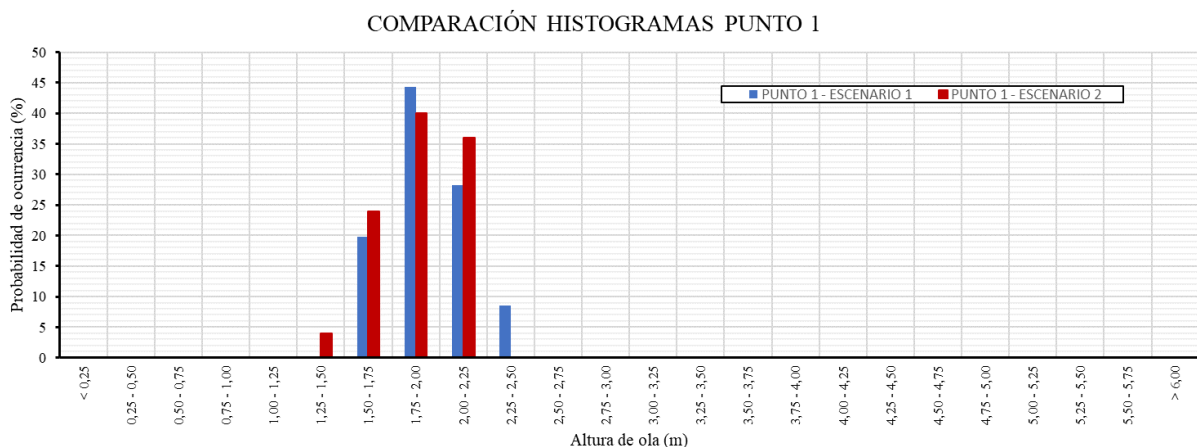


Figura 120 Comparativa histogramas de alturas de ola Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 1

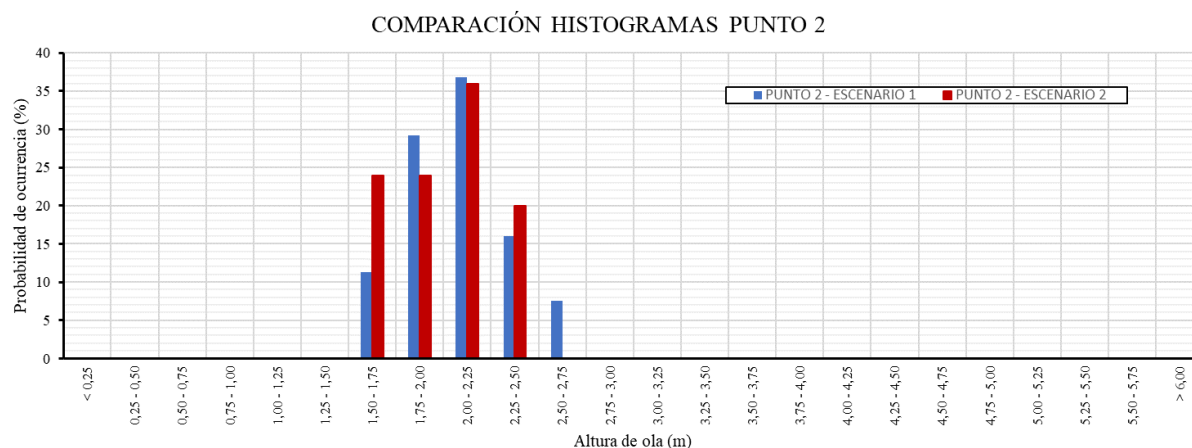


Figura 121 Comparativa histogramas de alturas de ola Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 2



Figura 122 Comparativa histogramas de alturas de ola Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 3

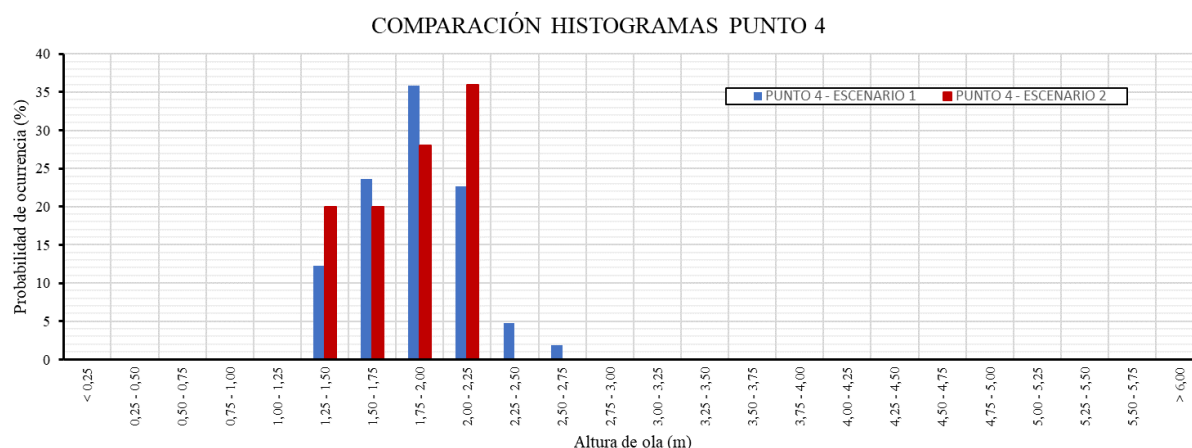


Figura 123 Comparativa histogramas de alturas de ola Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 4

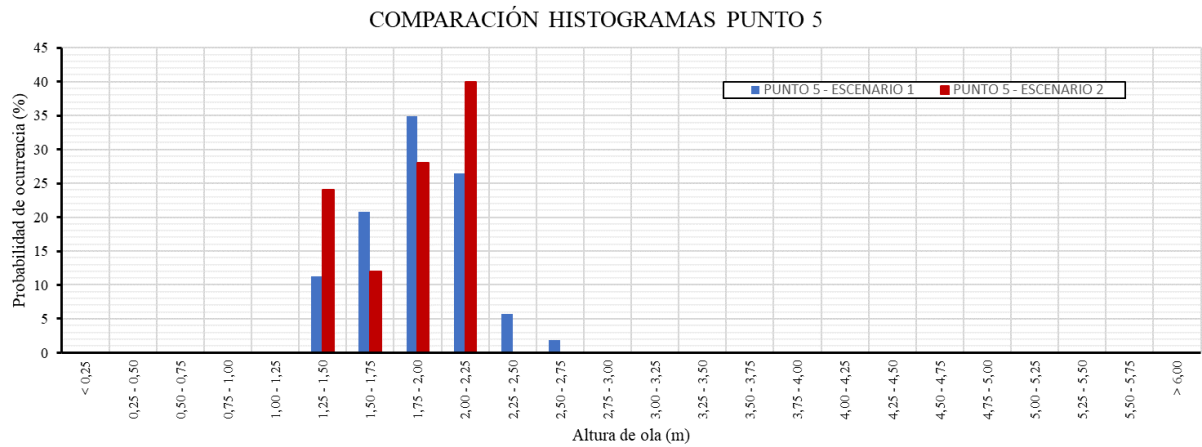


Figura 124 Comparativa histogramas de alturas de ola Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 5

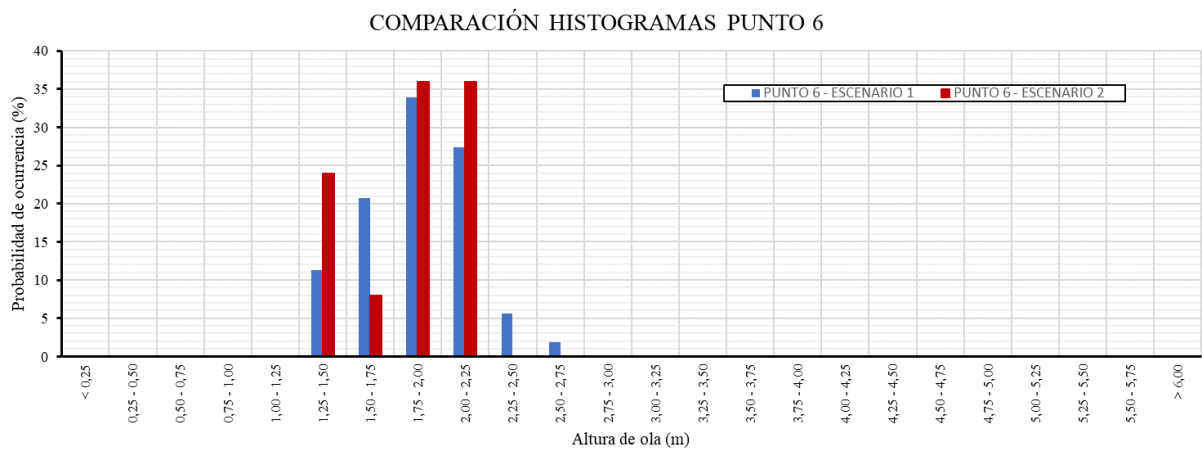


Figura 125 Comparativa histogramas de alturas de ola Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 6

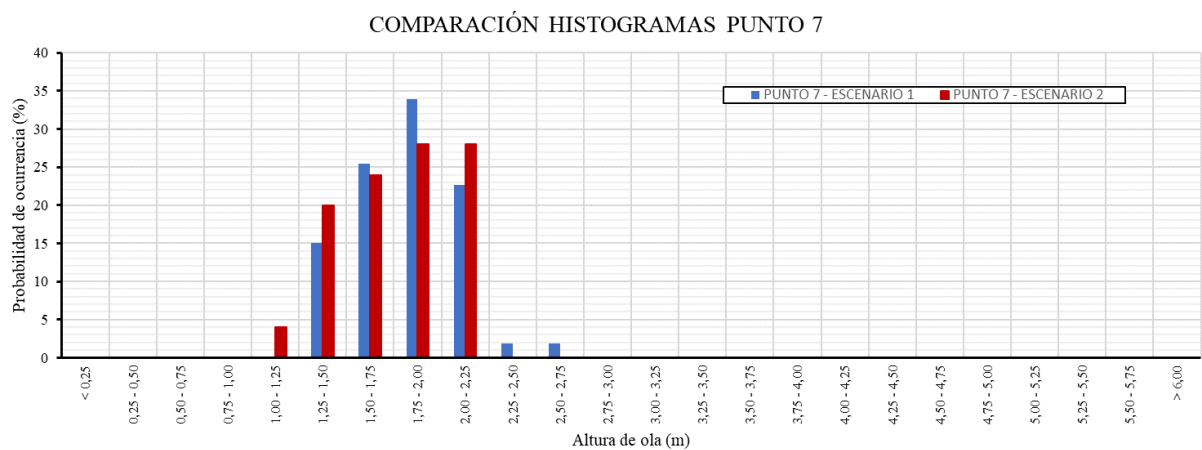


Figura 126 Comparativa histogramas de alturas de ola Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 7



Figura 127 Comparativa histogramas de alturas de ola Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 8

A partir de los histogramas, se comprueba que en todos ellos los registros de alturas de ola en el escenario 2 tienden a desplazarse hacia la izquierda apareciendo olas de menor altura que en el escenario 1 no tenían registro.

De este modo se observa que las alturas inferiores a 1,50 m en el escenario 1 no aparecen contempladas en los histogramas de los puntos 7 y 8 donde en cambio en el escenario 2 sí que se dan con cierta frecuencia, al igual que ocurre en el punto 1.

Por otro lado, desaparecen en el escenario 2 entre uno y dos rangos de alturas de ola mayores a los 2,25 m que sí se registran en el escenario 1, donde llegan hasta valores de 2,75 m de altura de ola en todos los puntos menos en el primero. En el punto 1 no llegan a dicha altura, pero sí se registran olas de hasta 2,50 m que no se registran en el escenario 2.

Aun así, se entiende que los histogramas son muy similares, teniendo en cuenta que el escenario 2 cuenta con un número de temporales mucho menor y que por tanto los valores extremos que pueden registrarse en el escenario 1 son de mayor intensidad debido a una mayor amplitud de la muestra.

Para un mejor análisis se comprueban los valores extremos de cada escenario, y se calculan también los valores medios. Se comprueba así si los valores máximos, mínimos y medios de cada uno de los escenarios son parecidos en cuanto a forma y valor absoluto o no.

Para ello se muestra a continuación en la Tabla 30 los valores numéricos, que se ilustran seguidamente a través de la Figura 128.

TRAMO	ESCENARIO 1			ESCENARIO 2		
	H <sub>media</sub> (m)	H <sub>min</sub> (m)	H <sub>max</sub> (m)	H <sub>media</sub> (m)	H <sub>min</sub> (m)	H <sub>max</sub> (m)
1	1,80	1,38	2,32	1,74	1,33	2,10
2	1,95	1,49	2,56	1,90	1,41	2,28
3	2,00	1,51	2,67	1,94	1,43	2,28
4	1,73	1,26	2,58	1,69	1,25	2,10
5	1,76	1,23	2,56	1,71	1,18	2,11
6	1,77	1,26	2,54	1,72	1,18	2,10
7	1,69	1,18	2,49	1,64	1,12	2,06

Tabla 30 Valores extremos de las alturas de ola en los puntos de control en Escenario 2



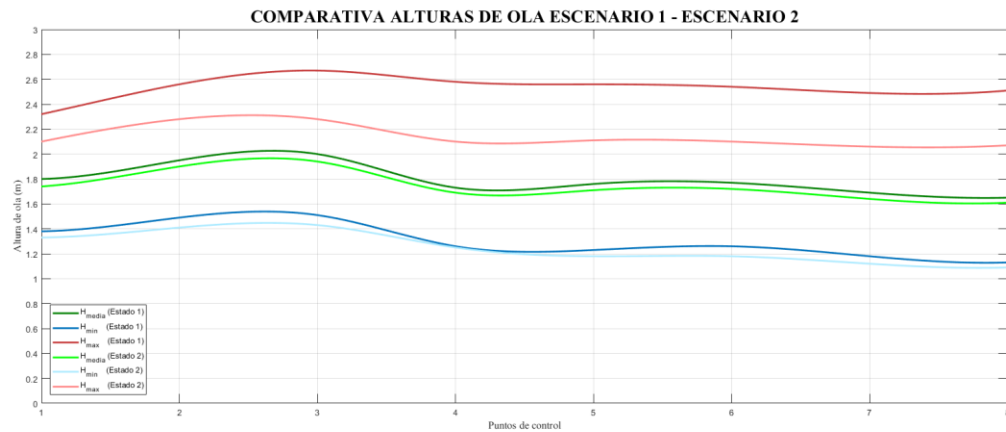


Figura 128 Comparativa extremos de alturas de ola en Escenario 1 y Escenario 2

Como se puede comprobar en la Figura 128, los valores de uno y otro escenario tienen numerosas coincidencias a la vez que describen una forma prácticamente idéntica. En los dos casos se observa un repunte de los valores de alturas de ola tanto máximos, como mínimo y medios en el tramo comprendido entre los puntos 2 y 3, coincidentes con la formación del tómbolo de poniente. A partir de ese tramo se observa el descenso de todos los valores hasta el espigón de Punta del Moral, describiéndose un leve repunte en el tómbolo de levante, pero sin mayor notoriedad y sin alcanzar los valores que se alcanzan en el tómbolo de poniente.

Analizando más detenidamente cada curva, se observa que los valores medios, así como los valores mínimos son prácticamente iguales en ambos escenarios, siendo por apenas unos centímetros un poco superiores en el escenario 1.

En cuanto a los valores máximos sí que se nota una amplia diferencia entre los escenarios, contemplando el escenario 1 valores considerablemente superiores a los correspondientes al escenario 2. Esta diferencia en los valores máximos puede deberse a que el tamaño de la muestra del escenario 2 es considerablemente inferior a la muestra del escenario. De este modo las alturas de ola con probabilidades de ocurrencia muy bajas, como pueden ser esos máximos, no llegan a aparecer en los registros del segundo escenario.

Es por ello por lo que cuando se mostraban los histogramas, los correspondientes al escenario 2 abarcaban alturas de ola menores sin obtener registros en rangos superiores.

#### 7.2.1.2 Dirección del oleaje

Comparadas las alturas de ola y comprobado que a pesar de ser una muestra menor ambos escenarios tienen coherencia y siguen un mismo patrón, se pasa a analizar las direcciones del oleaje en cada uno de los escenarios en los ocho puntos de control.

Para ello se exponen entre la Figura 129 y la Figura 136, al igual que se hiciese con las alturas de ola, los histogramas de cada escenario.

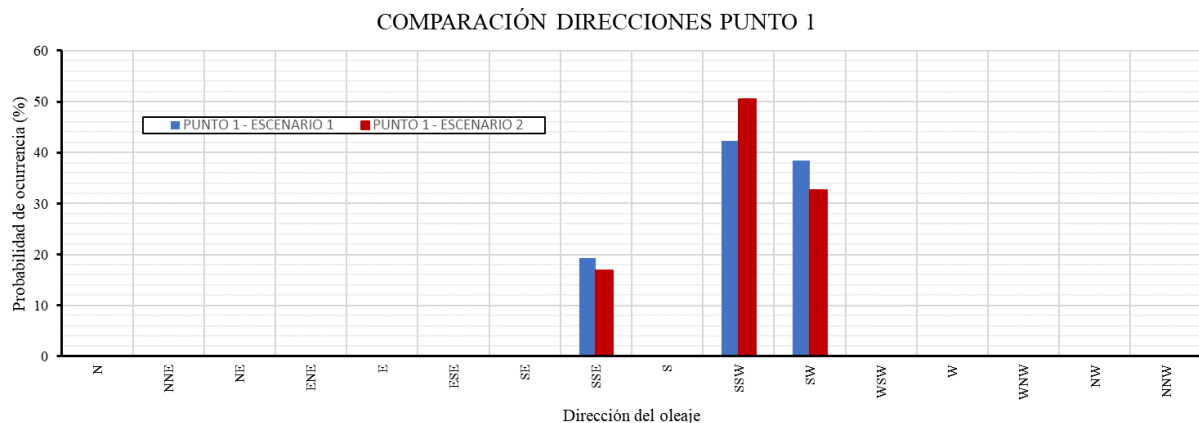


Figura 129 Comparativa histogramas de direcciones Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 1

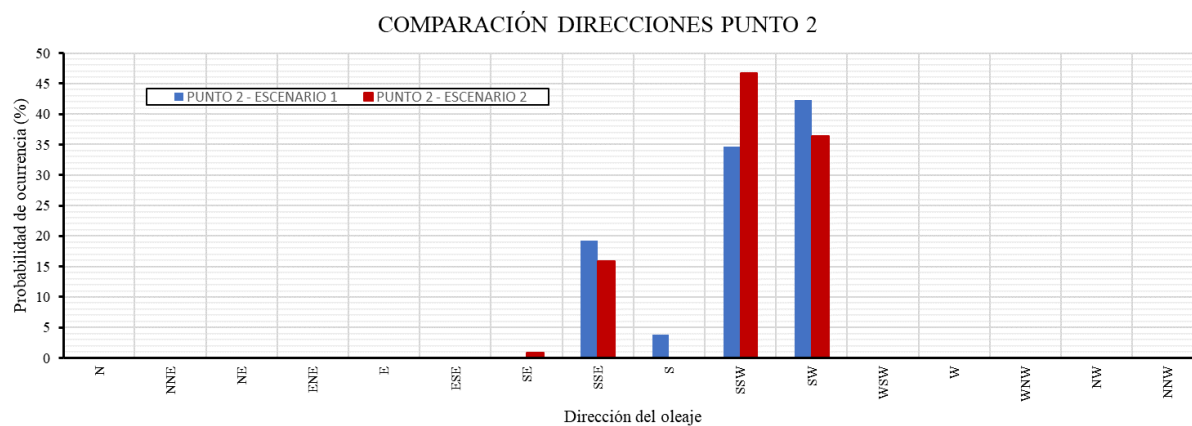


Figura 130 Comparativa histogramas de direcciones Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 2

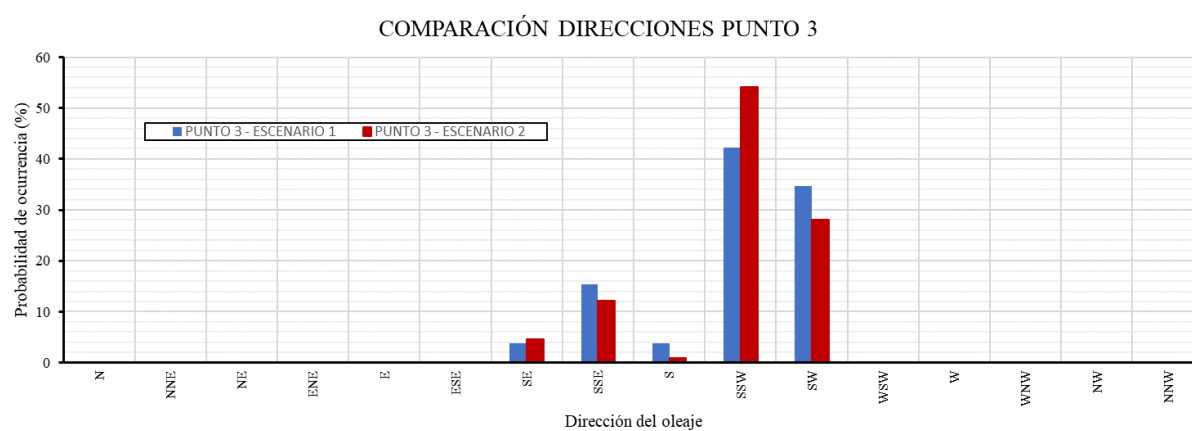


Figura 131 Comparativa histogramas de direcciones Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 3

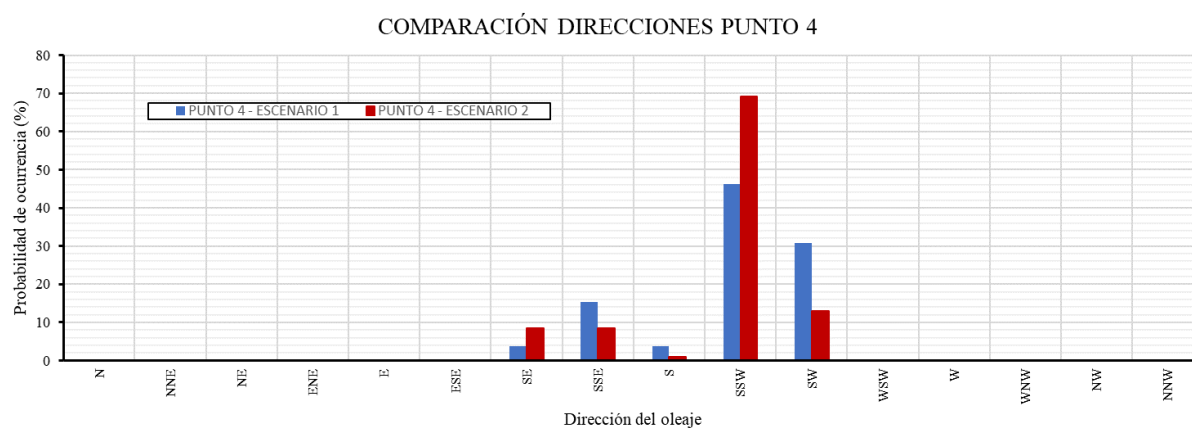
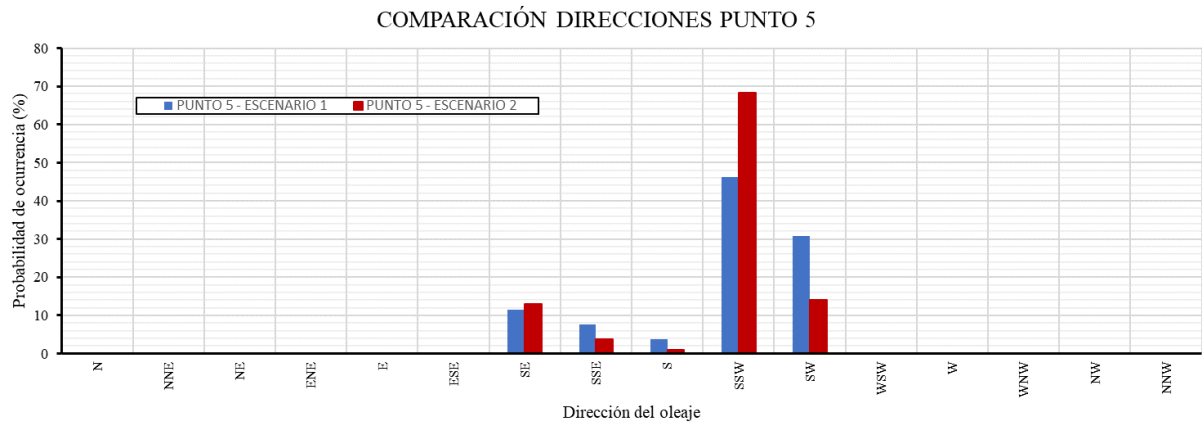
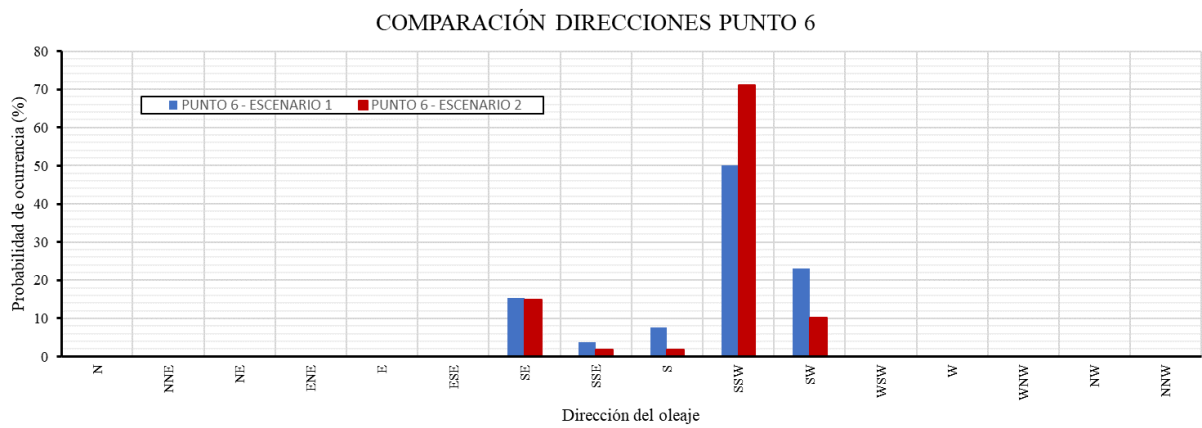


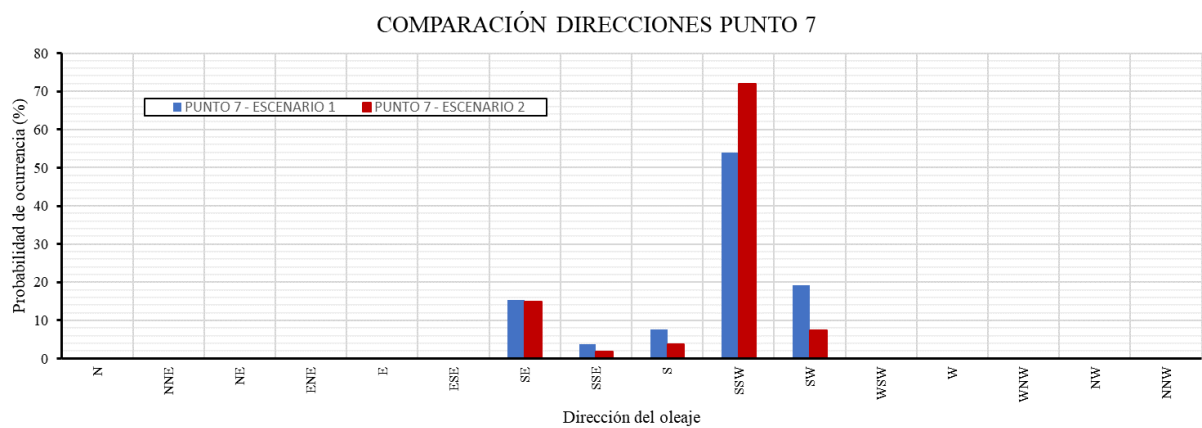
Figura 132 Comparativa histogramas de direcciones Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 4



*Figura 133 Comparativa histogramas de direcciones Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 5*



*Figura 134 Comparativa histogramas de direcciones Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 6*



*Figura 135 Comparativa histogramas de direcciones Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 7*

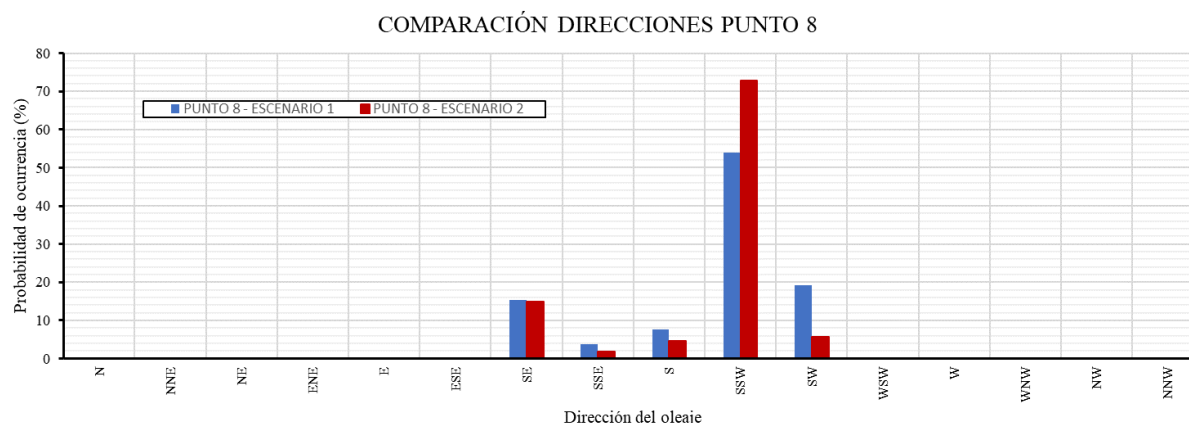


Figura 136 Comparativa histogramas de direcciones Escenario 1 y Escenario 2 en el punto 8

De los histogramas de direcciones se extrae que el oleaje incidente de dirección Sureste es prácticamente idéntico en porcentaje en ambos escenarios en todos los puntos.

Por otro lado, en cuanto a los oleajes del Suroeste, se aprecia alguna variación entre ambos escenarios. Primero de todo destaca que el pico de porcentaje en el escenario 2 supera en todos los perfiles al escenario 1, aunque la dirección predominante se mantiene en el SSO.

Este repunte de la dirección SSO en el escenario 2, con una media un 15% superior, a excepción del punto 1 donde aumenta aproximadamente un 5%, implica de forma directa una bajada en las direcciones del mismo cuadrante, lo cual hace que la franja de direcciones se estreche en el cuadrante S-O hacia la dirección SSO.

## 7.2.2 Sedimentación/Erosión

Para comprar los dos escenarios en cuanto a las tasas de erosión o sedimentación obtenidas se plantea un análisis a partir de variables globales.

Para ello se analizan los valores medios que se han obtenido a partir de uno y otro escenario en cada uno de los tramos. Se calcula también la tasa media anual que se produce suponiendo que, siendo fieles a la hipótesis de partida, los valores de transporte calculado se dan al igual que el oleaje en un periodo temporal del 1% del año (88 horas al año).

De este modo, a continuación, en la Tabla 31, se indican los valores medios globales (valores acumulados de erosión y sedimentación) de cada escenario y su equivalencia en un periodo anual.

TRAMO	ESCENARIO 1		ESCENARIO 2	
	$\Delta Q_{\text{medio}} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$\Delta Q_{\text{medio}} \text{ (m}^3/\text{año)}$	$\Delta Q_{\text{medio}} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$\Delta Q_{\text{medio}} \text{ (m}^3/\text{s)}$
1	-0,1914	-60.360	-0,1551	-48.912
2	0,0190	5.992	0,0223	7.033
3	0,1190	37.528	0,0207	6.528
4	-0,0351	-11.069	-0,0437	-13.781
5	0,0127	4.005	0,0084	2.649
6	-0,0105	-3.311	-0,0064	-2.018
7	0,0287	9.051	0,0236	7.442

Tabla 31 Valores de erosión/sedimentación medio anual en cada uno de los tramos

Expuestos los valores, lo primero que resalta es la concordancia en cuanto a zonas de sedimentación y erosión entre ambos escenarios.

Se mantiene por tanto una primera zona de la desembocadura con altos valores de erosión, seguido de una zona donde de sedimentación que provoca la aparición del tómbolo de poniente. Entre el tómbolo de poniente y el de levante, se localiza otra zona con un grado también importante de erosión. Por último, desde el tómbolo de levante hasta el espigón de Punta del Moral la playa se encuentra generalmente en un estado de sedimentación, a excepción de una parte de la playa de los Haraganes que registra una leve tasa de erosión.

En cuanto a los valores absolutos tampoco difieren en exceso un escenario frente al otro, a excepción del tramo 3 donde en el escenario 1 se obtiene una tasa anual de casi 40.000 m<sup>3</sup> frente a los escasos 6.500 m<sup>3</sup> que se obtienen en el escenario 2.

Comparados los valores medios se pasa a comparar los valores acumulados totales a lo largo de los años simulados, sacándose para cada uno de los estados la tasa anual sufrida de media a lo largo de los años de simulación.

Este análisis permite conocer a medio plazo el comportamiento de la playa ya que se pueden dar temporales de con direcciones diferentes que puedan hacer que la playa evolucione de una u otra manera, pero a través de una simulación temporal más larga se pueden observar cambios globales y tendencias en periodos temporales mayores.

De este modo se entiende que las simulaciones desarrolladas son lo suficientemente longevas para comprobar dichos valores.

TRAMO	ESCENARIO 1		ESCENARIO 2	
	$\Delta Q_{\text{acumulado}} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$\Delta Q_{\text{anual}} \text{ (m}^3/\text{año)}$	$\Delta Q_{\text{acumulado}} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$\Delta Q_{\text{anual}} \text{ (m}^3/\text{año)}$
01 – 02	-20,4820	-201.850	-4,0316	-211.900
02 – 03	2,0353	20.058	0,5794	30.452
03 – 04	1,2750	12.565	0,5390	28.328
04 – 05	-3,7549	-37.005	-1,1374	-59.784
05 – 06	1,3566	13.369	0,2172	11.414
06 – 07	-1,1254	-11.091	-0,1677	-8.813
07 – 08	3,0659	30.214	0,6146	32.301

*Tabla 32 Valores de erosión/sedimentación medio anual en cada uno de los tramos*

A través de los datos mostrados se confirma que la tendencia es la que se ha venido mostrando y que los valores anuales tanto del escenario 1 como del escenario 2 mantienen una relación de semejanza general, aunque siguen existiendo grandes diferencias en la zona central donde las tasas de sedimentación obtenidas según el escenario 1 y el escenario 2 varían en gran cantidad.

Dado que lo que se han calculado son tasas puntuales en zonas amplias, se asociará el valor calculado al punto medio entre los dos perfiles y se obtendrá mediante ajuste por una función polinómica, la función continua capaz de representar la tasa de erosión o sedimentación en la zona de estudio.

Se muestra a continuación en la Figura 137 el ajuste realizado de cada uno de los escenarios.

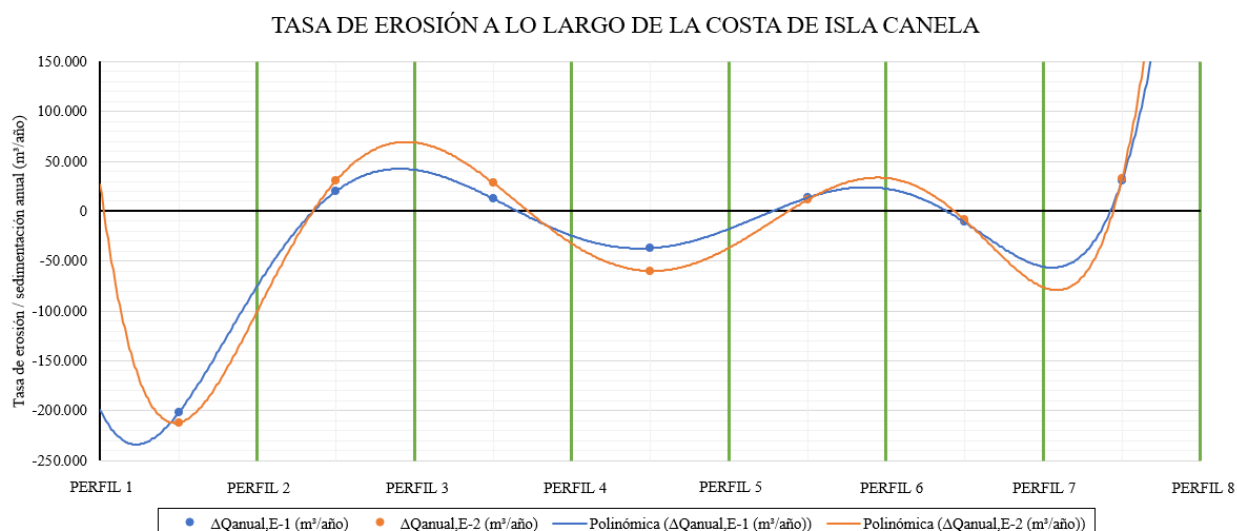


Figura 137 Tasa de erosión/sedimentación en Escenario 1 (azul) y Escenario 2 (naranja) a lo largo de la costa

A través de la Figura 137 se confirma que ambos escenarios coinciden prácticamente en la misma caracterización de la costa, lo cual implica que no se han producido grandes variaciones en el escenario 2.

Por último, se observan que los valores de erosión que se obtienen en los tramos más occidentales, en la desembocadura del Guadiana, son excesivamente altos saliéndose de la media del resto de la playa. Estos valores pueden deberse a que el estudio está basado única y exclusivamente en la influencia del oleaje en la costa, sin tener por tanto en cuenta el aporte de sedimentos que proporciona el río.

Dicho aporte del río depende del caudal de descarga de este y la regulación aguas arriba, así como en el periodo mareal que se encuentre la zona. De cara a ofrecer un valor estimativo del volumen que este aporta se han consultado diferentes trabajos aportando estos valores del mismo orden de magnitud.

Volumen de sedimentos fluviales	Fuente
270.000 m³/año	Morales González, J. A. (1995)
240.000 m³/año	SEIA (1995)

Tabla 33 Volumen de sedimentos de aportación a la zona costera por el río Guadiana

De este modo se comprueba como valores de erosión que rondan los 200.000 m³/año pueden ser mitigados a partir del aporte del propio río al menos en gran medida.

## 8 CONCLUSIONES

---

La playa de Isla Canela, a lo largo de las últimas décadas, ha venido sufriendo y sigue sufriendo, importantes problemas relacionados con la erosión de la costa. Esto ha supuesto que se hayan visto afectadas y amenazadas las urbanizaciones que se alojan a la espalda de la playa, al encontrarse éstas en zonas donde la anchura de la playa no es la suficiente.

La playa de Isla Canela ha sido objeto de numerosas actuaciones que se enumeran a continuación por orden cronológico:

- Construcción del encauzamiento del canal náutico de acceso por la desembocadura del río Guadiana (espigón de Vila Real de Sto. Antonio y espigón sumergido de Isla Canela).
- Construcción del encauzamiento de la bocana de entrada al puerto de Isla Cristina a través de los espigones de Punta del Moral e Isla Cristina.
- Regeneración de la playa de Isla Canela mediante aportación de material dragado y recuperación de los bajos frente a la misma con el fin de mitigar la virulencia de los temporales en la zona.
- Protección longitudinal de la zona central de la playa de Isla Canela mediante manto de escollera para proteger las urbanizaciones de su trasdós.

Debido a éstas actuaciones se ha potenciado a lo largo de la playa la alternancia de zonas de erosión y sedimentación, provocando la modificación de la línea de costa.

De este modo podemos diferenciar dos partes dentro de la playa de Isla Canela; la parte de levante, caracterizada por altos valores de sedimentación fomentados por la contención que ofrece el espigón de Punta del Moral, y la parte de poniente, más activa morfodinámicamente a través de la formación de dos tómbolos y el retroceso considerable de la línea de costa en el tramo comprendido entre ellos.

Es en esta segunda parte donde la barrera que ofrece el espigón de Vila Real unido a los bajos que se provocan como consecuencia del delta sumergido de la desembocadura, hacen que el oleaje incidente en la zona se vea refractado en diferentes direcciones modificando la dirección natural del sedimento que sería Oeste – Este.

Definido el problema, a continuación, y a lo largo de este capítulo recopilatorio se ofrecen las conclusiones obtenidas de cada una de las partes de las que ha constado el presente trabajo.

### 8.1 Clima marítimo

Se ha desarrollado un estudio del clima marítimo de la zona de estudio, caracterizándose según una descripción general en aguas profundas, el régimen medio de la zona y el régimen extremal.

El rango de alturas de ola en aguas profundas oscila entre 0 y 7,80 m, siendo las más frecuentes aquellas entre 0,25 y 1,25 m, produciéndose en el 76% de los casos. Los periodos oscilan entre los 2 y 19,70 s, siendo los más frecuentes entre 4 y 8 s, produciéndose en el 63% de los casos. Las direcciones de procedencia más frecuentes para el oleaje son del O (42% del tiempo), OSO (15% del tiempo) y SE (13% del tiempo).

Para el régimen medio escalar se obtiene que la altura de ola cuya probabilidad de no excedencia es del 50% es 0,80 m y la altura de ola cuya probabilidad de no excedencia es del 85% de 1,55 m. Se han analizado las tres direcciones de oleaje más predominantes los valores. Para la dirección O es de 0,70 m la altura de ola con probabilidad de no excedencia del 50% y 1,15 m para el 80%. Para la dirección OSO la altura de ola con probabilidad de no excedencia del 50%, es de 1,10 m y de 2,10 m para el 80%. Por último, para los oleajes de dirección SE, la altura de ola con probabilidad de no excedencia del 50%, es de 1,05 m y de 1,85 para probabilidades del 80%.

Estos valores indican que el oleaje del OSO es el más predominante y también es el más agresivo.

El rango de velocidades de viento oscila entre 0 y 21,60 m/s, siendo las más frecuentes entre 2 y 8 m/s, que ocurren el 76% del tiempo. Las direcciones de procedencia más frecuentes para el viento son las que se encuentran dentro del cuadrante N-O (43%) y el OSO (10%).

El rango de mareas en la zona de estudio se sitúa en una carrera de mareas media de 2,00 m, que oscila entre mareas vivas de 3,70 m y mareas muertas de 0,90 m.

### 8.2 Modelo numérico

El modelo que se ha utilizado en este trabajo es el Delft3D. Se trata de un modelo desarrollado por la Universidad tecnológica de Delft (Holanda) que es capaz de estimar las características del oleaje en zonas costeras, estuarios, lagos, canales, islas... generado tanto por vientos locales como por las corrientes.

Para calibrar el modelo el parámetro que se ha utilizado ha sido el coeficiente de Collins de fricción del fondo. Se ha encontrado que el valor del coeficiente de Collins que mejor se ajusta para esta zona es el de 0,10.

El modelo ha quedado validado en función del ajuste de los valores del periodo pico ya que la variación en las otras variables era prácticamente nula. Queda por tanto calibrado con un coeficiente de correlación medio de 0,80 y un parámetro de Skill de 0,79.

### 8.3 Escenarios

Se han definido dos escenarios de modo que el primero corresponde con la serie temporal que utiliza REDIAM para la obtención de la tasa de erosión de la costa (1977 – 2009) y el segundo amplía el periodo temporal entre los años 2009 y 2015. Sobre dichos escenarios se han analizado la influencia que tiene los temporales sobre la morfodinámica de la costa.

### 8.4 Tasa de erosión

Para el cálculo de la tasa de erosión a lo largo de la costa se ha hecho uso de la formula del CERC para calcular la tasa de transporte longitudinal de sedimentos en ocho perfiles perpendiculares a la costa separados 750 m cada uno a lo largo de la playa de Isla Canela. Los perfiles elegidos tienen una longitud de 4.000 m y alcanzando todos valores de profundidades superiores a los 10 m.

Para los dos escenarios propuestos se han obtenido resultados muy parejos pudiéndose dividir la zona de estudio en un total de 6 tramos caracterizados bien por ser tramos erosivos o sedimentarios. A continuación, se describe cada tramo estudiado (Figura 119).

Se exponen a continuación las conclusiones relativas a la influencia del oleaje en la morfodinámica de cada uno de los tramos en los que se ha dividido la costa.

- Playa de San Bruno.

Es una zona con altos niveles de erosión (alcanza valores según este estudio de 200.000 m<sup>3</sup>/año de déficit, lo cual no es realista al no considerar la aportación del Guadiana). La erosión viene provocada fundamentalmente por la difracción que induce el espigón de Vila Real de Sto. Antonio, provocando que el oleaje predominante del Suroeste al encontrarse con el espigón gire en torno al morro de éste, y cambie la dirección en ese punto, introduciendo los frentes de onda dentro de la desembocadura. En concreto en la zona de San Bruno, esos frentes de onda que deberían provocar un transporte longitudinal de sedimentos en dirección Este de forma natural, cambian la dirección del transporte hacia el Oeste provocando un déficit de sedimentos en la zona provocando erosión y el retroceso de la línea de costa.



- Tómbolo de poniente.

Es una zona con un alto nivel de sedimentación (valores de sedimentación de entre 40.000 y 50.000 m<sup>3</sup>/año), lo cual ha provocado la formación del tómbolo de poniente. Esta zona llega a contar con más de 200 m de ancho de arena seca proveniente de las zonas colindantes que sufren una fuerte erosión. Los bajos que se alojan frente a la costa, provocados por el delta sumergido del Guadiana, hacen que esa zona se encuentre con una mayor protección frente a temporales en los que el oleaje incidente pierde gran parte de energía en esos bajos. Esto provoca que se almacene el sedimento en esa zona y que se haya formado a lo largo de los últimos años el tómbolo de poniente.

- Zona de protección mediante escollera.

Es una zona caracterizada por una fuerte erosión, alcanzando valores que rondan los 60.000 m<sup>3</sup>/año. Esta fuerte erosión ha provocado que con marea alta no haya arena seca y con marea baja solo emerjan apenas 10 m de ancho de playa. Al encontrarse entre los dos tómbolos se trata de la principal zona de aporte de sedimentos para ambos sufriendo transporte longitudinal de sedimentos en los ambos sentidos.

- Tómbolo de levante.

Al igual que ocurre en el tómbolo de poniente, la zona del tómbolo de levante viene caracterizada por unos niveles de sedimentación elevados, aunque no alcanza los valores que se dan en el tómbolo de poniente. Se cifra el aporte de sedimentos de la zona en unos 10.000 m<sup>3</sup>/año. Esta aportación de sedimentos viene tanto del Este como de Oeste, siendo ambas zonas colindante zonas que se encuentran en erosión.

- Playa de los Haraganes.

Este tramo de costa se encuentra en erosión, con valores de déficit de sedimentos de media que rondan los 10.000 m<sup>3</sup>/año. Es aquí donde se encuentran las mayores discrepancias con respecto a los datos que facilitados por la Junta de Andalucía a través de REDIAM sobre de la vulnerabilidad de la costa. De igual modo, los valores de erosión registrados no llegan a los valores que se alcanzan en la zona de San Bruno o entre los dos tómbolos.

- Playa de Punta del Moral.

Con valores de sedimentación que superan los 30.000 m<sup>3</sup>/año es junto con el tómbolo de poniente la zona que mayor anchura de playa ha ganado a lo largo de los últimos años. Estos altos valores de sedimentación y la ganancia de playa vienen por la construcción del espigón de canalización del río Carreras que intercepta el transporte en ese punto y almacena el sedimento en la zona de Punta del Moral. De este modo llegan a darse valores de de anchura en la playa de hasta 200 m.

De este modo se concluye afirmando que, la playa de Isla Canela se encuentra en un proceso dinámico de búsqueda del equilibrio tras las últimas intervenciones a las que se ha visto sometido, tendiendo a la migración del sedimento a las tres zonas de sedimentación marcadas (tómbolos de poniente y levante y zona de Punta del Moral). Este movimiento del sedimento provoca la erosión de las zonas de la playa de San Bruno y la zona entre los tómbolos, actualmente protegida mediante manto de escollera.



# Apéndice A: Red de puertos del estado

---

El conjunto de datos SIMAR nos proporcionan registros temporales cada 3 horas de parámetros de viento y oleaje, resultado de un modelo numérico (WAM), es decir, son datos simulados o datos sintéticos obtenidos a partir del procesado mediante modelos espectrales de medidas directas tomadas a través de las boyas de puertos del estado.

El conjunto REDMAR son una serie de mareógrafos de la Red de Mareógrafos de Puertos del Estado cuya función no es más que la de medir de forma continua el nivel de mar en los puertos. De este modo se obtienen series históricas de las carreras de marea experimentadas en el punto y por tanto es posible extraer los armónicos de marea de la zona y con ellos calcular de forma prácticamente exacta la marea astronómica en cualquier fecha y en cualquier punto.

## A.1. Procedencia y obtención del conjunto SIMAR

Las series SIMAR surgen de la concatenación de los dos grandes conjuntos de datos simulados de oleaje con los que tradicionalmente ha contado Puertos del Estado.

- SIMAR-44
- WANA

Las series SIMAR surgen de la concatenación de los dos grandes conjuntos de datos simulados de oleaje con los que tradicionalmente ha contado Puertos del Estado: SIMAR-44 y WANA. El objetivo es el de poder ofrecer series temporales más extensas en el tiempo y actualizadas diariamente. De este modo, el conjunto SIMAR ofrece información desde el año 1958 hasta la actualidad.

Este trabajo de fusión se ha aprovechado para ampliar también la cobertura espacial, ampliando considerablemente el lote de puntos disponibles tanto en el Mar Mediterráneo como en el Océano Atlántico, en aguas abiertas como en costa, llegando a ofrecer datos a escala portuaria.

## A.2. Subconjunto SIMAR-44

El conjunto SIMAR-44 se constituye a partir de modelado numérico de alta resolución de atmósfera, nivel del mar y oleaje que cubre todo el entorno litoral español. La simulación de atmósfera y oleaje en la cuenca mediterránea han sido realizadas por Puertos del Estado en el marco del Proyecto Europeo HIPOCAS. Los datos del dominio Atlántico y el Estrecho de Gibraltar proceden de dos simulaciones análogas de oleaje y viento, una realizada por Puertos del Estado de forma independiente y la otra por Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA) en el marco del proyecto VANIMEDAT-II.

Seguidamente se da una breve descripción del modo en que se ha generado cada uno de los agentes simulados.

### A.2.1. Viento

Los datos de viento del Mediterráneo se han obtenido mediante el modelo atmosférico regional REMO, forzado por datos del análisis global NCEP. Dicho análisis asimila datos instrumentales y de satélite. El modelo REMO se ha integrado utilizando una malla de 50 Km de longitud x 50 Km de latitud con un paso de tiempo de 5 minutos.

Los datos de viento facilitados son promedios horarios a 10 m de altura sobre el nivel del mar.

Para la obtención de los datos de viento en el Atlántico y del Estrecho de Gibraltar se ha utilizado el modelo regional RCA3.5 alimentado con los datos del análisis atmosférico global ERA-40. Estas simulaciones fueron realizadas por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) con una resolución en la malla de 20 Km de latitud por 20 Km de longitud.

Debido a la resolución de las mallas utilizadas para integrar los modelos, REMO y RCA3.5, no es posible reproducir el efecto de accidentes orográficos de extensión inferior a 50Km y 20 Km respectivamente. Tampoco quedan modelados la influencia en el viento de procesos de convección de escala local. No obstante, el modelo reproduce correctamente los vientos regionales inducidos por la topografía como el Cierzo, Tramontana, Mistral, etc. De modo general es más fiable la reproducción de situaciones con vientos procedentes de mar.

### A.2.2. Oleaje

Para generar los campos de oleaje se ha utilizado en modelo numérico WAM. Dicha aplicación es un modelo espectral de tercera generación que resuelve la ecuación de balance de energía sin establecer ninguna hipótesis a priori sobre la forma del espectro de oleaje. Los datos se han generado con una cadencia horaria. Se ha realizado descomposición de mar de viento y mar de fondo. Con el fin de describir situaciones con mares de fondo cruzados, se ha considerado la posibilidad de dos contribuciones de mar de fondo.

Para el área mediterránea se ha utilizado una malla de espaciamiento variable con una resolución de 25 Km de latitud x 25 Km de longitud para el borde Este de la malla y de 12,5 Km de latitud x 12,5 Km de longitud para el resto del área modelada.

Por otro lado, para el área atlántica se ha utilizado una malla de espaciamiento variable que cubre todo el Atlántico Norte con una resolución de 50 Km latitud x 50 Km longitud para las zonas más alejadas de la Península Ibérica y de Canarias, aumenta a 25 Km de latitud x 25 Km de longitud al aproximarse. Para el entorno del Golfo de Cádiz, Estrecho de Gibraltar y del Archipiélago Canario se han anidado a la malla principal mallas secundarias con mayores resoluciones.

El modelo WAM utilizado para generar estos datos incluye efectos de refracción y asomeramiento. No obstante, dada la resolución del modelo, se pueden considerar despreciables los efectos del fondo. Por tanto, para uso práctico los datos de oleaje deben de interpretarse siempre como datos en aguas abiertas a profundidades indefinidas.

## A.3. Parámetros disponibles del SIMAR

A continuación, se listan los parámetros accesibles a través de los puntos SIMAR.

- $H_{m0}$	Altura significativa espectral	(m)
- $T_{m02}$	Periodo medio espectral momentos 0 y 2	(sg)
- $T_p$	Periodo de pico espectral	(sg)
- $Dir_M$	Dirección media de procedencia del oleaje	(0=N,90=E)
- $H_{m0\_V}$	Mar de viento: Altura significativa espectral	(m)
- $Dir_{M\_V}$	Mar de viento: Dirección media de procedencia	(0=N,90=E)
- $H_{m0\_F1}$	Mar de fondo 1: Altura significativa espectral	(m)
- $T_{m02\_F1}$	Mar de fondo 1: Periodo medio espectral	(s)
- $Dir_{M\_F1}$	Mar de fondo 1: Dirección media de procedencia	(0=N,90=E)
- $H_{m0\_F2}$	Mar de fondo 2: $H_{m0}$	(m)
- $T_{m02\_F2}$	Mar de fondo 2: Periodo medio espectral	(s)
- $Dir_{M\_F2}$	Mar de fondo 2: Dirección media de procedencia	(0=N,90=E)
- $Vel_v$	Velocidad media del viento	(m/s)
- $Dir_v$	Dirección media de procedencia del viento	(0=N,90=E)





# Apéndice B: Ecuaciones del modelo

En este apéndice se muestran las ecuaciones que utiliza el modelo WAVE de Delft3D para el cálculo a través del modelo numérico de la propagación del oleaje.

## B.1. Ecuación de balance de acción

En Delft3D (WAVE), el oleaje se describe con el espectro de densidad de acción de onda bidimensional, incluso cuando dominan los fenómenos no lineales (por ejemplo, en una zona de navegación). El motivo para usar el espectro en tales condiciones altamente no lineales es que, incluso en tales condiciones parece posible predecir con suficiente exactitud una distribución espectral del momento de segundo orden de del oleaje (aunque puede que no sea suficiente para describir completamente las diferentes olas estadísticamente).

El espectro que se considera en WAVE es el espectro de densidad de acción  $N(\sigma, \theta)$  en lugar del espectro de densidad de energía  $E(\sigma, \theta)$  ya que, en presencia de corrientes, la densidad de acción se conserva, mientras que la densidad de energía no (Whitham, 1974).

Las variables independientes son la frecuencia relativa y la dirección del oleaje (la dirección normal a la cresta de la ola de cada componente espectral). La densidad de acción es igual a la densidad de energía dividida por la frecuencia relativa:  $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma$ . En WAVE este espectro puede variar en tiempo y espacio.

El modelo WAVE describe el espectro de oleaje a través de un balance de acción espectral. La ecuación para coordenadas cartesianas es la siguiente (Hasselmann et al. (1973)).

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (B-1)$$

El primer término de la ecuación representa la tasa local de cambio de densidad en el tiempo, el segundo y tercer término representan la propagación de la acción en el espacio (con velocidades de propagación  $c_x$  y  $c_y$  en los espacios  $x$  e  $y$ , respectivamente). El cuarto término representa el desplazamiento de la frecuencia relativa debido a las variaciones en la profundidad y corriente (con velocidad de propagación  $c$  en  $\sigma$ -space). El quinto término representa profundidad y corriente inducida refracción. Para el cálculo de la velocidad de propagación se utiliza la formulación de la teoría lineal de onda (Whitham, 1974; Mei, 1983; Dingemans, 1997).

El término  $S$ , en el lado derecho de la ecuación, es el término correspondiente a la fuente de densidad de energía que representa los efectos de generación, disipación e interacciones no lineales entre dos olas. Un breve resumen de las formulaciones que se utilizan para los diferentes términos de fuente en WAVE se explican a continuación.

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds,w} + S_{ds,br} + S_{ds,b} \quad (B-2)$$

Siendo:

- $S_{in}$  Transferencia de energía al oleaje debida al viento.
- $S_{nl}$  Interacciones no lineales entre olas.
- $S_{ds,w}$  Disipación de energía en aguas profundas debido al descrestamiento.
- $S_{ds,br}$  Disipación de energía debido a la rotura por disminución de la profundidad.
- $S_{ds,b}$  Disipación de energía por fricción con el fondo.

Los procesos que WAVE tiene en cuenta son los siguientes.

- Generación del oleaje a través del viento.
- Disipación de energía del oleaje por descrestamiento, fricción con el fondo y rotura por profundidad.
- Interacciones no lineales entre dos olas.
- Propagación del oleaje a través de obstáculos
- Cálculo del set-up y set-down.

### B.1.1. Transferencia de energía al oleaje debida al viento

La transferencia de energía al oleaje debido a la acción del viento se describe en WAVE por medio de un mecanismo de resonancia (Phillips, 1957) y un mecanismo de retroalimentación (Miles, 1957). El termino fuente de energía en estos casos se toma como la suma entre el crecimiento lineal y el crecimiento exponencial.

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + B \cdot E(\sigma, \theta) \quad (B-3)$$

Donde A y B dependen de la frecuencia y dirección del oleaje y la velocidad y dirección del viento. Los efectos de las corrientes se tienen en cuenta en WAVE mediante el uso de la velocidad del viento aparente y dirección. La expresión para el término A se debe a Cavaleri y Malanotte-Rizzoli (1981) con un filtro para evitar el crecimiento en frecuencias más bajas que la frecuencia de Pierson-Moskowitz (Tolman, 1992a).

$$A = \frac{1,50 \cdot 10^{-3}}{2\pi \cdot g^3} \cdot (U_* \cdot \max[0, \cos(\theta - \theta_w)])^4 \cdot H \quad (B-4)$$

Donde  $\theta_w$  es la dirección del viento y H es el filtro anteriormente referido.

$$H = \exp \left[ - \left( \frac{\sigma}{\sigma_{PM}^*} \right)^{-4} \right] \quad (B-5)$$

donde,  $\sigma_{PM}^*$  es la frecuencia pico del estado de mar completamente desarrollado y reformulado en términos de la velocidad friccional.

$$\sigma_{PM}^* = \frac{0,13 \cdot g}{28 \cdot U_*} \cdot 2\pi \quad (B-6)$$

Se usan dos expresiones opcionales para el coeficiente B en el modelo. El primero es tomado de una versión anterior del modelo WAM (conocido como WAM Cycle 3, el grupo WAMDI (1988)). Se debe a Snyder et al. (1981), escalado en términos de velocidad de fricción  $U^*$  por Komen et al. (1984). El coeficiente de arrastre para relacionar  $U^*$  con la velocidad del viento a 10 m de altura  $U_{10}$  se toma de Wu (1982).

$$U_* = CD \cdot U_{10}^2 \quad (B-7)$$

La segunda expresión para B en SWAN se obtiene de la versión reciente del modelo WAM (conocido como WAM Cycle 4, Komen et al. (1994)). Es debido a Janssen (1991) y explica explícitamente la interacción entre el viento y el oleaje al considerar los efectos de la capa límite y la longitud de la rugosidad de la superficie del mar. El conjunto de ecuaciones correspondiente se resuelve (como en el modelo WAM) con el procedimiento iterativo de Mastenbroek et al. (1993).

$$B = \beta \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot \left( \frac{U_*}{c_{ph}} \right)^2 \cdot \max[0, \cos(\theta - \theta_w)]^2 \cdot \sigma \quad (B-8)$$

$$\beta = \frac{1,20}{\kappa^2} \cdot \lambda_h \cdot \ln^4(\lambda_h) \quad \lambda_h \leq 1 \quad (B-9)$$



$$\lambda_h = \frac{g \cdot z_e}{c_{ph}^2} \cdot e^\tau \quad \tau = \frac{\kappa \cdot c}{|U_* \cdot \cos(\theta - \theta_w)|} \quad (B-10)$$

Siendo:

- $c_{ph}$  Velocidad de fase
- $\rho_a$  Densidad del aire
- $\rho_w$  Densidad del agua
- $U^*$  Velocidad de fricción
- $\theta$  Dirección de propagación del oleaje
- $\theta_w$  Dirección del viento
- $\beta$  Constante de Miles, se calcula a partir de la altura critica no dimensional  $\lambda_h$

Siendo  $\kappa$  la constante de Von Karman de valor 0,41 y  $z_e$  la longitud de rugosidad efectiva. En el caso de que  $\lambda_h$  sea mayor o igual que 1, la constante de Miles  $\beta$  es igual a 0.

### B.1.2. Interacciones no lineales entre olas

Se consideran dos casos para las interacciones no lineales entre olas:

- Interacción triádica (triad interactions): se trata de la interacción entre tres olas, en la que dos olas interaccionan de manera lineal y le transfieren energía a una tercera. Este tipo de interacción tienen mayor importancia en aguas someras.
- Interacción cuádruple (quadruplets interactions): se trata de interacciones no lineales entre grupos de cuatro olas que intercambian energía entre ellas si se dan ciertas condiciones. Estas interacciones en cambio, tiene mayor importancia en aguas profundas.

#### B.1.2.1. Interacción triádica

La Aproximación a la Triada Concentrada (LTA) de Eldeberky y Battjes (1996), la cual es una leve adaptacion de la Aproximación Discreta a la Triada de Eldeberky y Battjes (1995), es la que utiliza WAVE en la discretización espectral.

$$S_{nl3}(\sigma, \theta) = S_{nl3}^-(\sigma, \theta) + S_{nl3}^+(\sigma, \theta) \quad (B-11)$$

Siendo

$$S_{nl3}^+(\sigma, \theta) = \max \left\{ 0, \alpha_{EB} \cdot 2\pi \cdot c \cdot c_g \cdot J^2 \cdot |\sin(\beta)| \cdot \left[ E^2 \left( \frac{\sigma}{2}, \theta \right) - 2 \cdot E \left( \frac{\sigma}{2}, \theta \right) \cdot E(\sigma, \theta) \right] \right\} \quad (B-12)$$

$$S_{nl3}^-(\sigma, \theta) = -2 \cdot S_{nl3}^+(\sigma, \theta) \quad (B-13)$$

Siendo,  $\alpha_{EB}$  una constante de proporcionalidad calibrable, y las celeridades de onda y grupo  $c$  y  $c_g$  respectivamente. La bi-fase se aproxima con la ecuación (B-14).

$$\beta = -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \cdot \tanh \left( \frac{0,20}{U_r} \right) \quad (B-14)$$

Siendo el número de Ursell:

$$U_r = \frac{g}{8 \cdot \pi^2 \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{H_s \cdot \bar{T}^2}{d^2} \quad \bar{T} = \frac{2\pi}{\bar{\sigma}} \quad (B-15)$$

Generalmente, las interacciones triadicas entre olas se calculan solo en un rango solo entre  $0,10 < U_r < 10$ , aunque por cuestiones de estabilidad se calcula en todo el rango  $0 < U_r < 10$ .

Esto implica que tanto la interacción triádica como la cuádruple se computan al mismo tiempo. El coeficiente de interacción  $J$  se calcula según Madsen y Sorensen (1993).

$$J = \frac{k_{\sigma/2}^2 \cdot (g \cdot d + 2 \cdot c_{\sigma/2}^2)}{k_{\sigma} \cdot d \cdot \left( g \cdot d + \frac{2}{15} \cdot g \cdot d^3 \cdot k_{\sigma}^2 - \frac{2}{5} \cdot \sigma^2 \cdot d^2 \right)} \quad (\text{B} - 16)$$

### B.1.2.2. Interacción cuádruple

Las interacciones entre cuádruples onda-onda se calculan con la aproximación de interacción discreta (DIA) según lo propuesto por Hasselman et al. (1985). Su término fuente ligeramente adaptado por Tolman (1993) se ha utilizado en el modelo WAVE. En la Aproximación de Interacción Discreta se consideran dos cuádruples de números de onda, ambos con sus frecuencias.

$$k_1 + k_2 = k_3 + k_4 \quad (\text{B} - 17)$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma \quad (\text{B} - 18)$$

$$\sigma_3 = \sigma \cdot (1 + \lambda) = \sigma^+ \quad (\text{B} - 19)$$

$$\sigma_4 = \sigma \cdot (1 - \lambda) = \sigma^- \quad (\text{B} - 20)$$

Donde  $\lambda$  es una constante que vale 0,25. Para satisfacer las condiciones de resonancia para el primer “cuádruple”, los vectores de número de onda  $k_3$  y  $k_4$  con frecuencias  $\sigma_3$  y  $\sigma_4$  forman un ángulo de  $\theta_1 = -11,5^\circ$  y  $\theta_2 = 33,6^\circ$  con  $k_1$  y  $k_2$ . El segundo “cuádruple” es el espejo de este primero, por lo que los vectores de número de onda con frecuencias  $\sigma_3$  y  $\sigma_4$  forman ángulos simétricos de  $\theta_1 = 11,5^\circ$  y  $\theta_2 = -33,6^\circ$ .

Dentro de esta aproximación de interacción discreta, el término fuente  $S_{nl4}(\sigma, \theta)$  viene dado por la siguiente ecuación (B - 21).

$$S_{nl4}(\sigma, \theta) = S_{nl4}^*(\sigma, \theta) + S_{nl4}^{**}(\sigma, \theta) \quad (\text{B} - 21)$$

Donde el que lleva un asterisco hace referencia al primer “cuádruple” y el que lleva dos hace referencia al segundo.

$$S_{nl4}^*(\sigma, \theta) = 2 \cdot \delta \cdot S_{nl4}^*(\alpha_1, \sigma, \theta) - \delta \cdot S_{nl4}^*(\alpha_2, \sigma, \theta) - \delta \cdot S_{nl4}^*(\alpha_3, \sigma, \theta) \quad (\text{B} - 22)$$

$$\alpha_1 = 1 \quad (\text{B} - 23)$$

$$\alpha_2 = (1 + \lambda) \quad (\text{B} - 24)$$

$$\alpha_3 = (1 - \lambda) \quad (\text{B} - 25)$$

Siendo, por tanto.

$$S_{nl4}^*(\alpha_i, \sigma, \theta) = C_{nl4} (2\pi)^2 g^{-4} \left( \frac{\sigma}{2\pi} \right)^{11} \left[ E^2(\alpha_i, \sigma, \theta) \left( \frac{E^2(\alpha_i, \sigma^+, \theta)}{(1 + \lambda)^4} + \frac{E^2(\alpha_i, \sigma^-, \theta)}{(1 - \lambda)^4} \right) - 2 \frac{E^2(\alpha_i, \sigma, \theta) \cdot E^2(\alpha_i, \sigma^+, \theta) \cdot E^2(\alpha_i, \sigma^-, \theta)}{(1 - \lambda^2)^4} \right] \quad (\text{B} - 26)$$

La constante  $C_{nl4}$  se calcula según la formulación de Hasselmann (1981).

$$C_{nl4} = 3 \cdot 10^7 \quad (\text{B} - 27)$$

En cuanto a la resolución del problema en aguas intermedias o aguas someras, la formulación es la misma multiplicando por un escalar de valor R.

$$S_{nl4,aguas\ intermedias}(\sigma, \theta) = R(k_p d) \cdot S_{nl4,aguas\ profundas}(\sigma, \theta) \quad (B-28)$$

Donde R se calcula según la ecuación (B-29).

$$R(k_p d) = 1 + \frac{C_{sh1}}{k_p \cdot d} \cdot (1 - C_{sh2} \cdot k_p \cdot d) \cdot \exp(C_{sh3} \cdot k_p \cdot d) \quad (B-29)$$

Siendo  $k_p$  el número de onda correspondiente al periodo pico del espectro Jonswap y los valores de las constantes los siguientes.

$$C_{sh1} = 5,50 \quad (B-30)$$

$$C_{sh2} = 6/7 \quad (B-31)$$

$$C_{sh3} = -1,25 \quad (B-32)$$

### B.1.3. Disipación de energía

El término de disipación de la energía de las olas está representado por la suma de tres contribuciones diferentes.

- Descrestamiento ( $S_{ds,w}(\sigma, \theta)$ ).
- Fricción con el fondo ( $S_{ds,b}(\sigma, \theta)$ ).
- Rotura inducida por profundidad ( $S_{ds,br}(\sigma, \theta)$ ).

#### B.1.3.1. Descrestamiento

El descrestamiento se controla principalmente por la pendiente de la pared de las olas. El funcionamiento actualmente modelos de oleaje de tercera generación (incluido WAVE) se basan en las formulaciones de descrestamiento de un modelo basado en impulsos (Hasselmann, 1974), adaptado por el grupo WAMDI (1988).

$$S_{ds,w} = -\Gamma \cdot \tilde{\sigma} \cdot \frac{k}{\tilde{k}} \cdot E(\sigma, \theta) \quad (B-33)$$

Donde las variables con gorro denotan la frecuencia media ( $\sigma$ ) y el número de onda medio ( $k$ ), según las expresiones (B-36) y (B-37). De igual modo el  $\Gamma$  depende del peralte de la ola.

$$\Gamma = \Gamma_{KJ} = C_{ds} \cdot \left( (1 - \delta) + \delta \cdot \frac{k}{\tilde{k}} \right) \cdot \left( \frac{\tilde{\sigma}}{\tilde{s}_{PM}} \right)^p \quad (B-34)$$

Para valores de  $\delta=0$ , la expresión (B-34) se reduce a la expresión utilizada por WAMDI (1988) (B-35).

$$\Gamma = \tilde{k} \cdot \sqrt{E_{tot}} \quad (B-35)$$

$$\tilde{\sigma} = \left( E_{tot}^{-1} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{\sigma} \cdot E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \right)^{-1} \quad (B-36)$$

$$\tilde{k} = \left( E_{tot}^{-1} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{k}} \cdot E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \right)^{-2} \quad (B-37)$$

$$E_{tot} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (B-38)$$

Los valores de los coeficientes  $C_{ds}$  y el exponente  $p$  se obtienen a partir de la formulación de Komen et al. (1984) cerrando un balance energético virtual según las ecuaciones (B-39), (B-40) y (B-41).

$$C_{ds} = 2,36 \cdot 10^{-5} \quad (B-39)$$

$$\delta = 0 \quad (B-40)$$

$$p = 4 \quad (B-41)$$

### B.1.3.2. Fricción por fondo

El modelo de fricción con el fondo que utiliza WAVE es el modelo empírico de Jonswap (Hasselmann et al. (1983)), el modelo de arrastre de Collins (1972) y el modelo empírico de Madsen (1988). Los tres modelos se pueden formular a partir de la siguiente expresión.

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \cdot \frac{\sigma^2}{g^2 \cdot \sinh^2(k \cdot d)} \cdot E(\sigma, \theta) \quad (B-42)$$

Donde el coeficiente  $C_{bottom}$  es el coeficiente de rozamiento por fondo que generalmente depende del movimiento orbital en el fondo ( $U_{rms}$ ) representado según la expresión (B-43).

$$U_{rms}^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sigma^2}{\sinh^2(k \cdot d)} \cdot E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (B-43)$$

Para el desarrollo de este trabajo el modelo de fricción por fondo que se ha escogido ha sido el modelo de Collins por lo que se obviara el resto de las formulaciones.

De este modo el coeficiente de rozamiento por fondo del modelo de Collins es el que se expone a partir de la expresión (B-44).

$$C_{bottom} = C_f \cdot g \cdot U_{rms} \quad (B-43)$$

Siendo  $C_f$  una constante de valor  $C_f = 0,015$  (Collins, 1972)

### B.1.3.3. Rotura inducida por la profundidad

Para modelar la disipación de energía en olas aleatorias debida a la rotura por la disminución de la profundidad WAVE utiliza el modelo de Battjes y Janssen (1978).

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = D_{tot} \cdot \frac{E(\sigma, \theta)}{E_{tot}} \quad (B-44)$$

Siendo:

- $D_{tot}$  Tasa media de disipación de energía por unidad horizontal debido a la rotura. (B-45)
- $E(\sigma, \theta)$  Espectro de densidad de energía del oleaje.
- $E_{tot}$  Energía total del espectro. (B-38)

$$D_{tot} = \frac{1}{4} \cdot \alpha_{BJ} \cdot Q_b \cdot \left( \frac{\sigma}{2\pi} \right) \cdot H_m^2 \quad (B-45)$$

Siendo:

- $\alpha_{BJ}$  Constante que ha de introducirse en el modelo.
- $Q_b$  Fracción de olas que rompen (Rayleigh) (B – 46).
- $\bar{\sigma}$  Frecuencia media del oleaje. (B – 47).
- $H_{2m} = \gamma \cdot d$  Altura para la rotura teniéndose que introducir en el modelo el valor de  $\gamma$ .

$$\frac{1 - Q_b}{\ln(Q_b)} = -8 \cdot \frac{E_{tot}}{H_m^2} \quad (B - 46)$$

$$\bar{\sigma} = E_{tot}^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \sigma \cdot E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (B - 47)$$



# Apéndice C: Parámetros del modelo

---

En el presente apéndice se recoge la descripción de cada uno de los parámetros que precisa el modelo numérico Delft3D WAVE para la propagación del oleaje empleado para el desarrollo del presente trabajo.

## C.1. Descripción (Description)

En la pestaña de descripción del modelo se puede identificar el archivo del Proyecto a través de una descripción completa del mismo, a través del título del proyecto, numeración en caso de tener más de un modelo para un mismo proyecto y una descripción.

Las restricciones que Delft3D impone en este aspecto se limita a.

- Nombre de proyecto, máximo de 16 caracteres.
- Numero de proyecto, máximo de 4 caracteres
- Descripción, máximo en tres líneas con un máximo de 72 caracteres.

## C.2. Hidrodinámica (Hydrodynamics)

En la pestaña de hidrodinámica se permite la ejecución conjunta del módulo FLOW del mismo software con el módulo WAVE. De este modo se puede especificar un cálculo de FLOW a través de un archivo desde el cual los resultados se utilizarán como entrada para el cálculo de la propagación a través de WAVE (denominado acoplamiento fuera de línea).

En este proyecto solo se ha utilizado el módulo WAVE.

## C.3. Mallado (Grid)

En este apartado es donde se define el mallado que se va a disponer y donde el software va a resolver la ecuación de equilibrio de ondas (ecuaciones descritas en el Anejo 2: Ecuaciones del modelo). El modelo WAVE permite la descripción de varias mallas dentro de una única ejecución, de modo que se aniden unas dentro de otras consiguiendo resoluciones más pequeñas en las zonas de interés.

Con la importación de cada malla, se accede a un segundo menú en el cual se encuentran los siguientes parámetros.

### C.3.1. Mallado computacional (Computational grid)

Esta pestaña ofrece los datos de la malla que está cargada y que va a utilizar el programa para la propagación del oleaje. Los datos que muestra son los siguientes.

- Archivo al cual está asociado el mallado.
- Archivo de la batimetría asociada al mallado.
- Malla a la que esta anidada en el caso de estarlo.
- Número de celdas que tiene en cada dirección

### C.3.2. Batimetría (Bathymetry)

En esta pestaña se introduce la batimetría asociada al mallado a través de un archivo con formato [.dep] que se ha debido calcular previamente.

En el caso de este trabajo ese archivo se ha creado a través de una rutina de MATLAB que interpola la batimetría de la zona en los puntos de la malla.

### C.3.3. Resolución del espectro (Spectral resolution)

Para cada malla que se haya introducido, el programa precisa de que se le especifique la resolución deseada del espectro. De este modo el software solo asignará energía del oleaje asociada al espectro en las direcciones y frecuencias que se indiquen en esta pestaña.

- Espacio direccional (directional space): Es donde definimos si el programa debe considerar los 360° correspondientes con todas las direcciones posibles o si de lo contrario, queremos limitar las direcciones del oleaje en un cierto sector circular.
- Espacio frecuencias (frequency space): De igual modo se limitará las frecuencias a computar a través de imponer una frecuencia máxima y una mínima y el incremento de frecuencias que se quiere considerar.

### C.3.4. Anidado de mallas (Nesting)

Como ya se mencionó, Delft3D permite el anidado de mallas con el fin de obtener valores con mayor precisión en aquellas zonas que sean de mayor interés. La idea que se busca con el anidado es tener una malla gruesa que provenga de aguas profundas y cuyo coste computacional no sea excesivo ya que no son valores que se precise una resolución muy fina y que dentro de dicha malla se alojen otras mallas más finas que permitan un cálculo más detallado.

De este modo la malla anidada coge automáticamente las condiciones de contorno a través de la propagación de la malla gruesa. De este modo solo se introducen las condiciones de contorno en la primera malla (malla gruesa).

El anidado de mallas ha de hacerse siempre en orden decreciente debiendo estar todos los contornos de la malla anidada dentro de la malla gruesa. Cuando se aniden mallas, como ha sido el caso de este trabajo, se debe importar primero de todo el mallado de todas las mallas, así como las batimetrías asociadas a las mismas.

### C.3.5. Hidrodinámica (Hydrodynamics)

En esta pestaña, en el caso de hacer uso del módulo FLOW, es donde se le indica al modelo que parámetros ha de tomar de los resultados de ese módulo. Como ya se ha dicho en este trabajo esta pestaña no se ha utilizado ya que solo se ejecuta el módulo WAVE.

## C.4. Espacio temporal (Time frame)

En esta pestaña se define la serie temporal en la cual se va a desarrollar el modelo, indicándose el periodo de tiempo en formato de (DD MM AAAA HH mm SS).

Para introducir las fechas en este trabajo, dado el gran número de fechas simuladas, se han introducido directamente que es el archivo [.mdw] que recoge toda la información referente al modelo. En este archivo se pegarán tantas estructuras como la que se muestra a continuación como estados de mar se vayan a modelar indicando el tiempo en minutos a partir de una fecha de referencia.

[TimePoint]

Time	= 1.1952000e+005
WaterLevel	= 0.0000000e+000
XVeloc	= 0.0000000e+000
YVeloc	= 0.0000000e+000



## C.5. Condiciones de contorno (Boundaries)

El programa da la posibilidad de elegir diferentes formas de seleccionar el contorno en el cual se introducen las condiciones de contorno, pudiéndose seleccionar a partir de la orientación del contorno, las coordenadas absolutas (X-Y) o bien a partir de las coordenadas de la malla en función del número de elemento.

La forma que se ha usado es mediante orientación ya que la malla se describió para que así se hiciera contemplándose 3 contornos mojados correspondientes con Oeste, Sur y Este.

Para la introducir las condiciones de contorno se ha creado a través de una rutina de MATLAB un archivo que lleva por nombre wavecon y la extensión ha de ser el nombre del archivo [.mdw] del modelo, en este caso wavecon.IslaCanela.

En dicho archivo se recogen todos los valores referentes a las condiciones de contorno tales como la altura de ola en aguas profundas, periodos pico, mareas, etc.

## C.6. Obstáculos (Obstacles)

En este apartado se puede especificar las características de una línea o polilínea de obstáculos dentro de la zona de estudio tales como diques o espigones a través de los cuales de refleja el oleaje. De este modo el obstáculo interrumpirá el oleaje en el elemento siguiente al que se encuentra. Con esto se consigue simular mejor la realidad de la zona de estudio.

La ubicación del obstáculo se introduce a partir de coordenadas de los vértices de una polilínea.

Los obstáculos que se han simulado en este proyecto son todos de tipo espigón (dam) para los cuales se precisa incluir en el programa los siguientes parámetros.

- Reflexión: Con esta opción se permite especificar si el obstáculo es reflexivo o no.
- Coeficiente de reflexión: El coeficiente de reflexión se formula según términos de la relación que existe entre la altura de ola que entra frente a la altura de ola reflejada.
- Altura: La altura del obstáculo se mide como la cota de coronación de este con respecto del mismo nivel de referencia sobre el que se mide la batimetría. De este modo se usarán valores negativos para aquellos obstáculos sumergidos.
- Alpha: Coeficiente de transmisión según la forma del espigón.
- Beta: Coeficiente de transmisión según la forma del espigón.

Nótese que, si se incorporan obstáculos reflexivos, ha de estar marcada en la resolución del espacio direccional todas las direcciones posibles.

## C.7. Parámetros físicos (Physical parameters)

Es uno de los apartados más importantes de todo el programa ya que son estos parámetros físicos los que controlan en mayor medida el correcto funcionamiento del modelo.

### C.7.1. Constantes (Constants)

Se definen los valores de algunas constantes que se indican a continuación.

- Gravedad: 9,81 m/s<sup>2</sup>
- Densidad del agua de mar: 1025 kg/m<sup>3</sup>
- Posición del eje x respecto al Norte: 90° (eje x en dirección Este)
- Profundidad mínima: 0,05 m
- Sistema de coordenadas: náuticas.
- Fuerzas: tensión por radiación.

### C.7.2. Viento (Wind)

El programa permite introducir valores de viento constante en el caso de que lo hubiera. En este trabajo esa pestaña no se ha tocado al introducirse el viento a través de las condiciones de contorno mediante el archivo wavecon.

### C.7.3. Procesos (Processes)

Dentro de la pestaña de procesos podemos activar, desactivar o modificar aquellos procesos a través de los cuales el modelo WAVE modifica la energía del oleaje. Estos procesos son los que se describen a continuación.

- Generación (Generation): Se utiliza el modelo de tercera generación. En este tipo de modelos todos los procesos relevantes están representados de forma explícita sin ninguna restricción, además, no se impone ninguna forma definida del espectro. Los modelos de tercera generación ofrecen una gran mejora respecto a los de generaciones anteriores al no utilizar formulaciones paramétricas simples, como las usadas por los modelos de segunda generación. En su lugar utilizan la aproximación de interacción discreta (DIA, Discrete Interaction Approximation) de Hasselman (1985). La característica de la aproximación de interacción discreta es que al contrario que las parametrizaciones de segunda generación que solo tienen un pequeño número de grados de libertad (entre 3 y 5), la DIA tiene tantos grados de libertad como valores  $\alpha$  en el espectro ya discretizado.
- Rotura inducida por fondo (Depth induced breaking, B&J model): Este parámetro definido en el apéndice anterior se define mediante dos parámetros:  $\alpha$  que se refiere al ratio de disipación y oscila entre 0 (ningún efecto) y 1 (el efecto por disipación es total), y  $\gamma$ , que se define según la siguiente expresión.

$$\gamma = \frac{\text{Altura de ola}}{\text{Profundidad}}$$

- Interacciones triádicas no lineales (Non-linear triad, LTA): los parámetros que han de definirse son:  $\alpha$ , que es el valor del coeficiente de proporcionalidad  $\alpha$  y  $\beta$  que determina el ratio entre la máxima frecuencia y la frecuencia principal para las cuales las interacciones son calculadas.
- Fricción del fondo (Bottom friction): este parámetro es el que más afecta al cálculo numérico de las simulaciones, de modo que es importante conseguir un buen ajuste mediante la calibración de este parámetro. De los tres modelos de fricción disponibles, se ha seleccionado el modelo Collins.
- Este valor es necesario calibrarlo.
- Difracción (Diffraction): una vez activada esta opción se definen dos valores: el coeficiente de suavizado (smoothing coeff.) y los pasos de suavizado (smoothing steps). Para este modelo se han definido 0,9 y 900 respectivamente.
- Varios (Various): en el apartado de “varios” se pueden activar o desactivar una serie de procesos tales como, el crecimiento de la ola debido al viento (wind growth), interacciones cuádruples (quadruplets) y descrestamiento (whitecapping). Para este proyecto solo se activa la opción de descrestamiento y se selecciona el modelo de Van der Westhuysen de las dos opciones posibles

### C.7.4. Varios (Various)

En este apartado aparecen una serie de procesos que se pueden marcar o desmarcar, pero que no hay que introducir ningún valor al programa. De modo que para que la ejecución del modelo sea lo más realista posible es necesario activar todos los procesos.

## C.8. Parámetros numéricos (Numerical parameters)

En esta pestaña viene indicado el tanto por ciento de puntos húmedos en los que el modelo debe converger, por defecto y el número máximo de iteraciones que se deben realizar en cada paso o barrido.

El procedimiento de cálculo del DELFT es el siguiente: Al ejecutar la simulación el programa empieza a realizar la primera iteración, dentro de ella se realizan cuatro barridos ("sweep") y al termina el cuarto barrido la primera iteración finaliza con un porcentaje de puntos húmedos en los que el modelo ha convergido, debiéndose alcanzar el valor que se le haya indicado (por defecto 98%).

A continuación, continúa con la segunda iteración, dentro de la cual vuelve a realizar los cuatro barridos y finaliza con otro porcentaje de puntos húmedo donde ya hay convergencia del modelo. Pues el modelo finalizará cuando se alcance la cantidad mínima de puntos donde se debe garantizar la convergencia o bien cuando se alcance el número máximo de iteraciones.

## C.9. Curvas de salida (Output curves)

Delft3D permite la posibilidad de obtener como salidas curvas graficas de diversos parámetros a lo largo de una polilínea la cual ha de describirse a través de sus coordenadas. En este trabajo no se ha hecho uso de esta herramienta.

## C.10. Parámetros de salida (Output parameters)

Esta pestaña te da la posibilidad de elegir qué modelo de cálculo se quiere utilizar para la resolución de la propagación, en este trabajo se ha optado por un modelo estacionario en el que cada estado de mar es independiente del otro y sus condiciones son estacionarias.

Del mismo modo hay que especificar dónde se quieren obtener los resultados, es decir, si tienes varias mallas en que mallas quieres obtener los resultados.

Por último, se pueden especificar los denominados puntos de control, utilizado para la calibración del modelo ya que indicando según sus coordenadas un punto Delft3D proporciona una tabla con los valores interpolados en ese punto exacto.

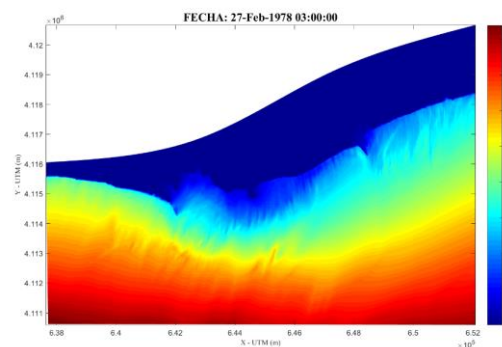
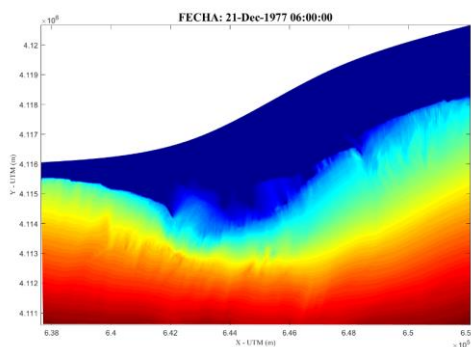
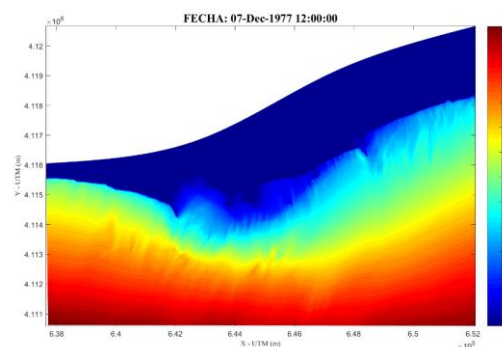
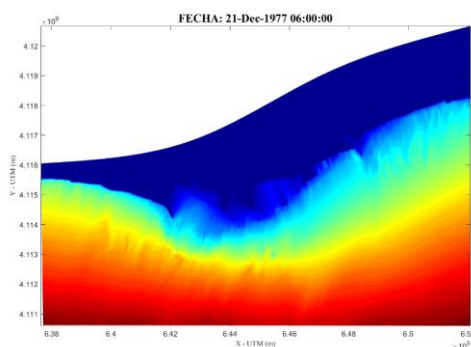
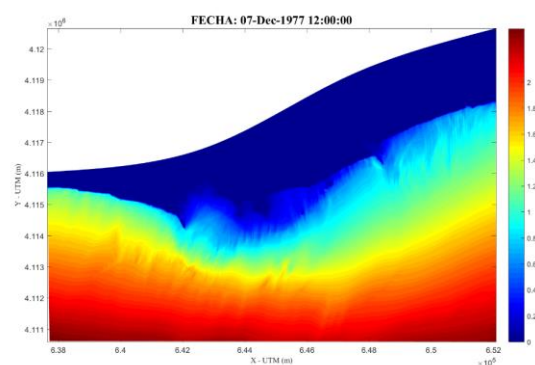
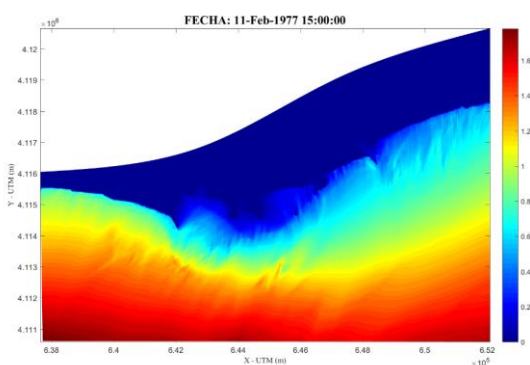
El programa por tanto dos formas de presentar los resultados, una de ellas es mediante una gráfica donde asigna a cada punto de la malla un dato de altura de ola, periodo, etc. Otra es en forma de tabla, en la que para cada punto de control que se introduzca mediante coordenadas UTM obtendremos los datos de salida en dicho punto específicamente.

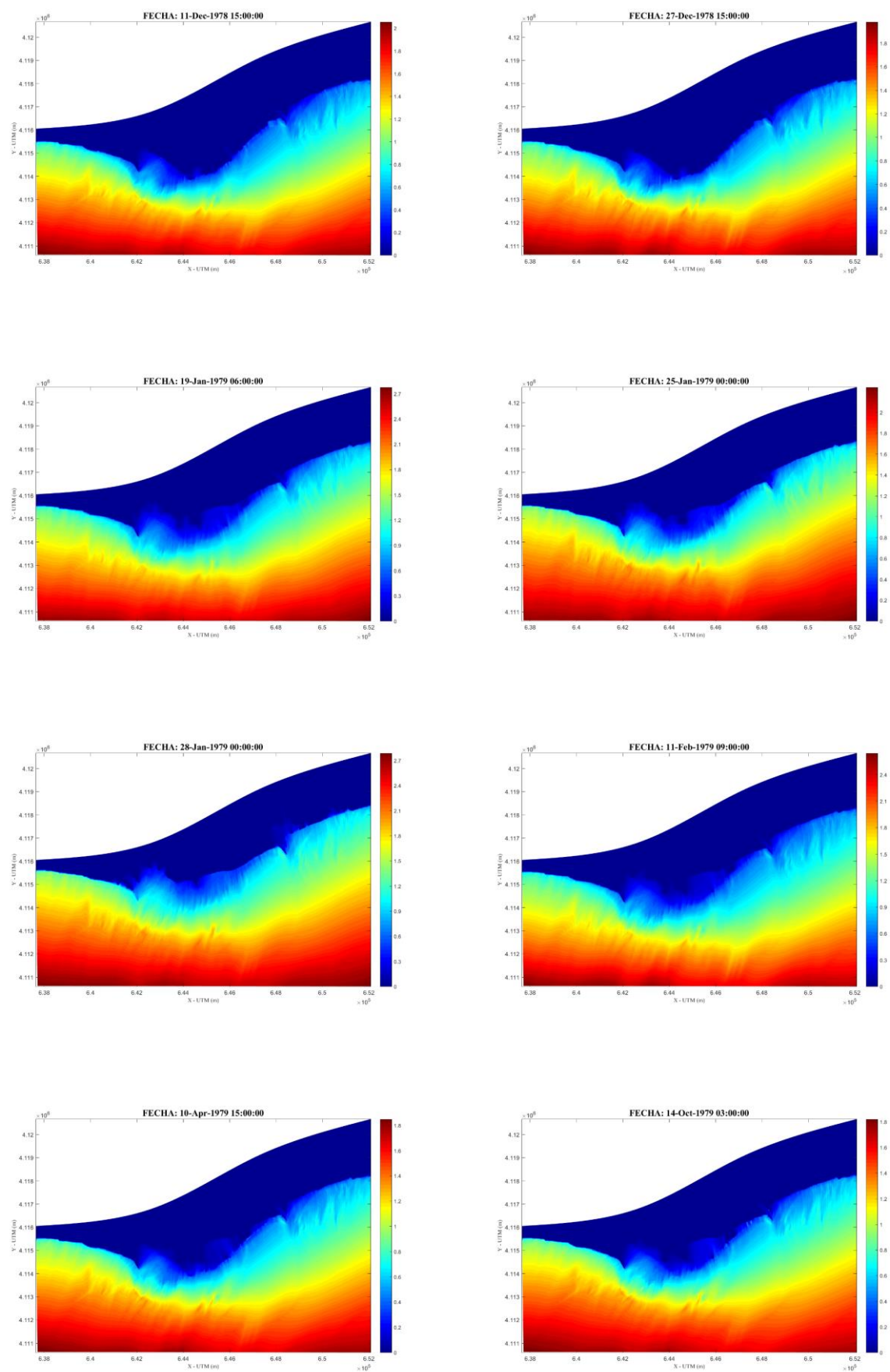


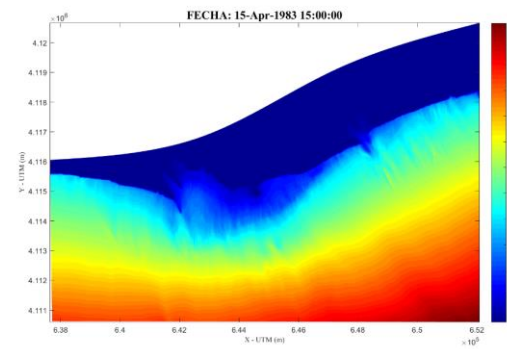
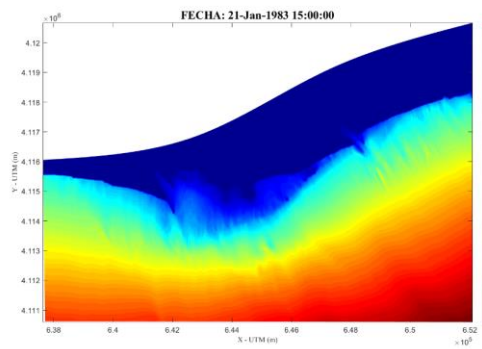
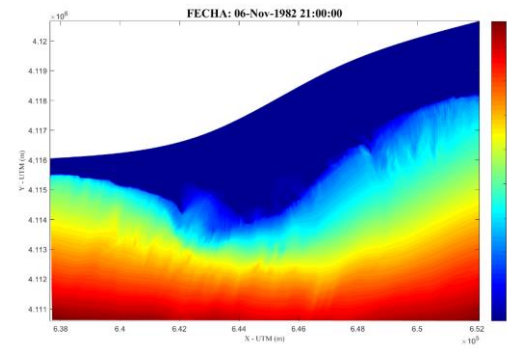
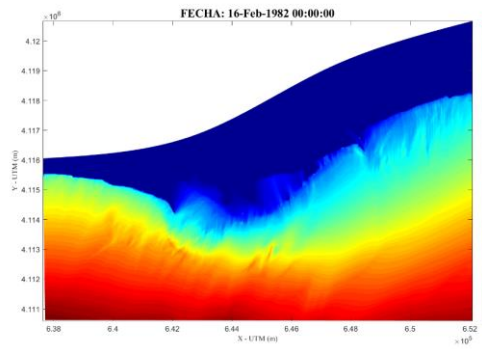
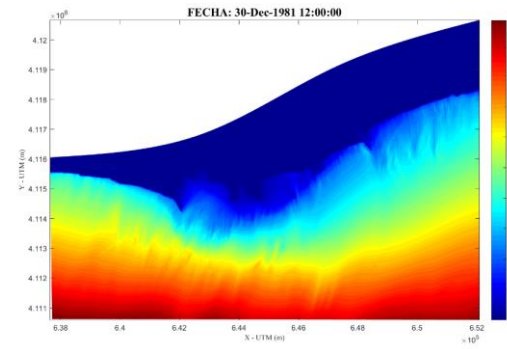
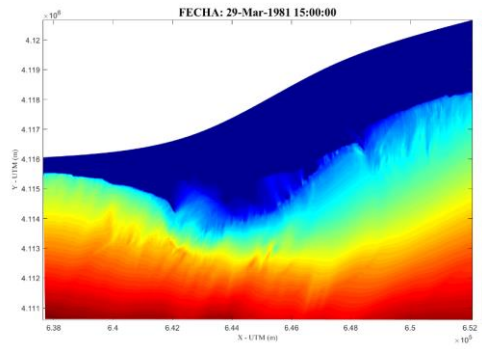
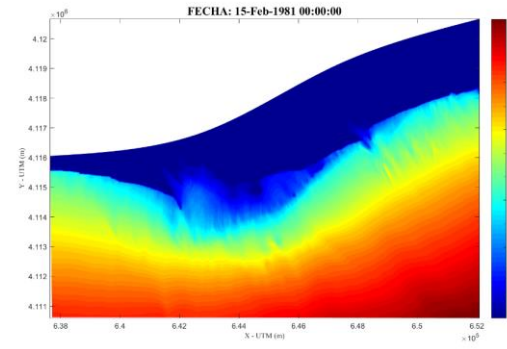
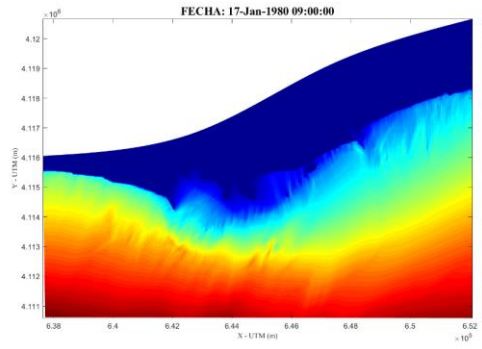
# Apéndice D: Resultados de propagación

Se exponen a continuación todos los resultados de la propagación de todas las alturas de ola de cada uno de los estados calculados (divididos en el escenario 1 y escenario 2).

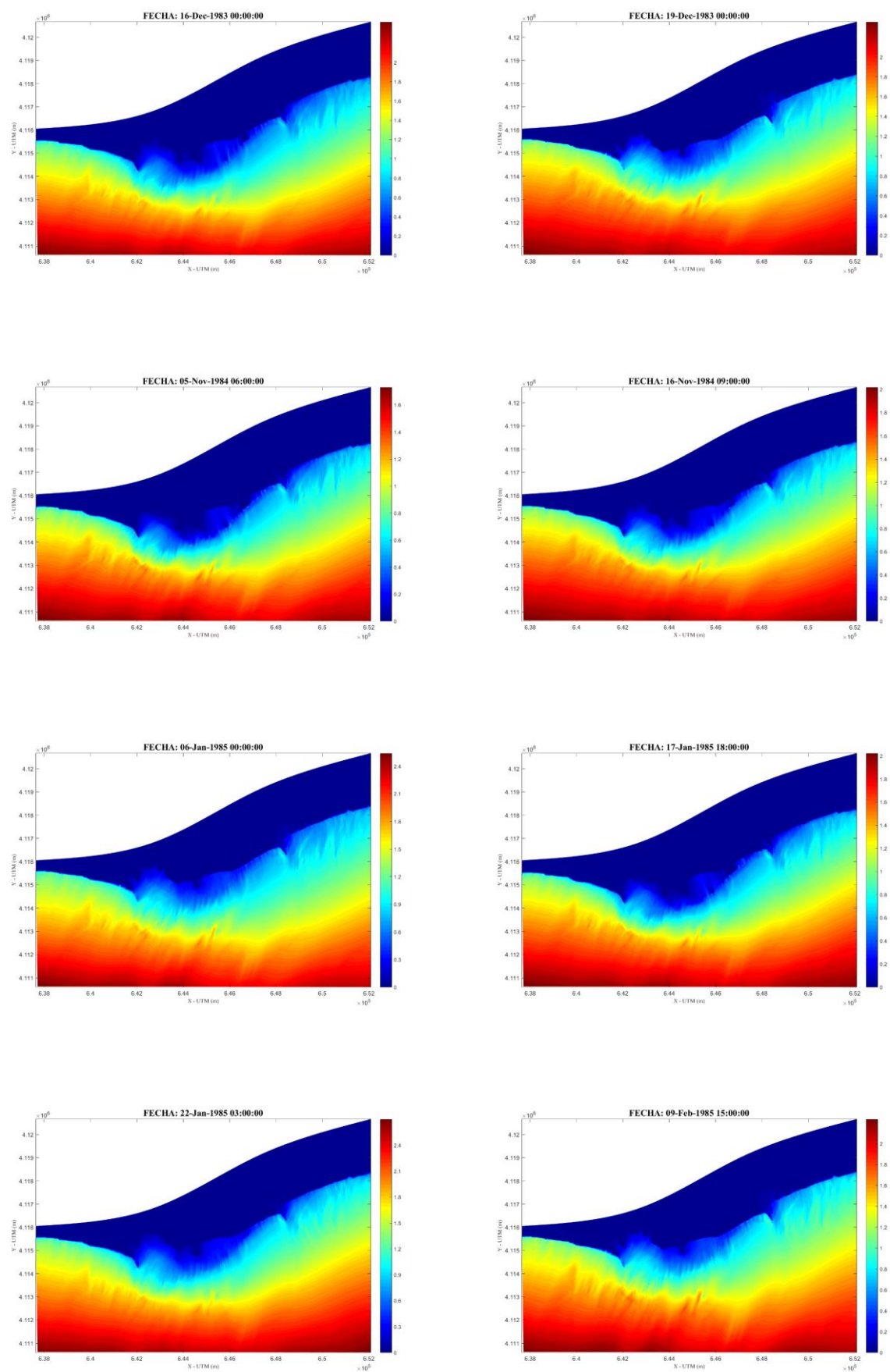
## D.1. Escenario 1



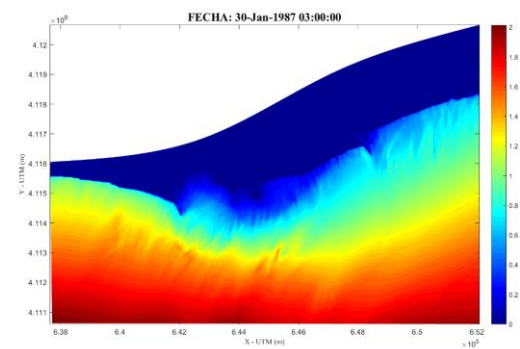
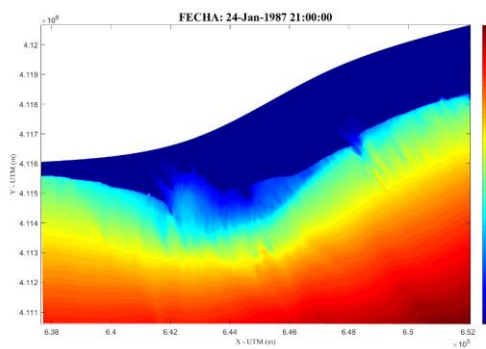
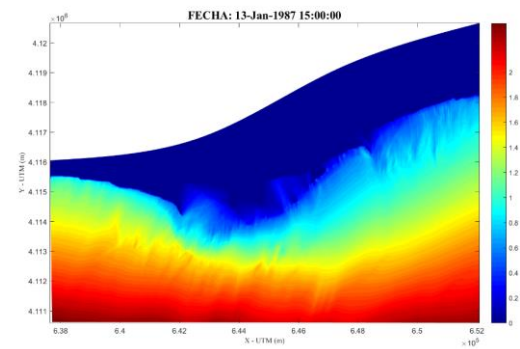
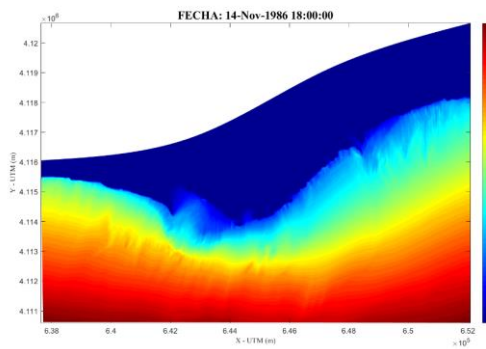
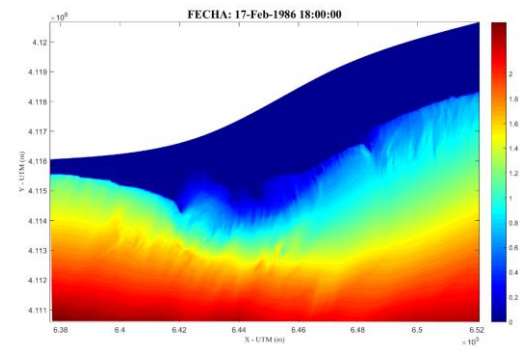
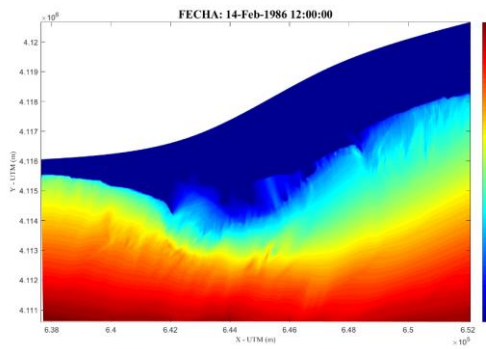
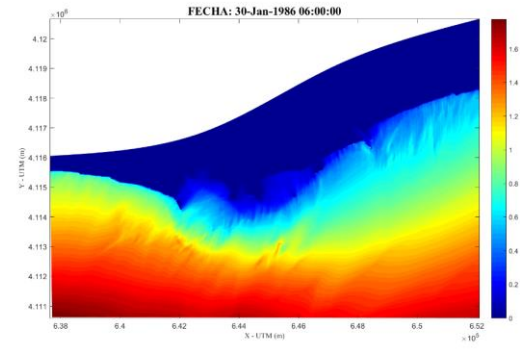
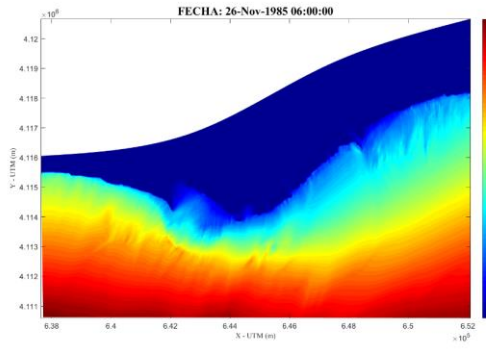


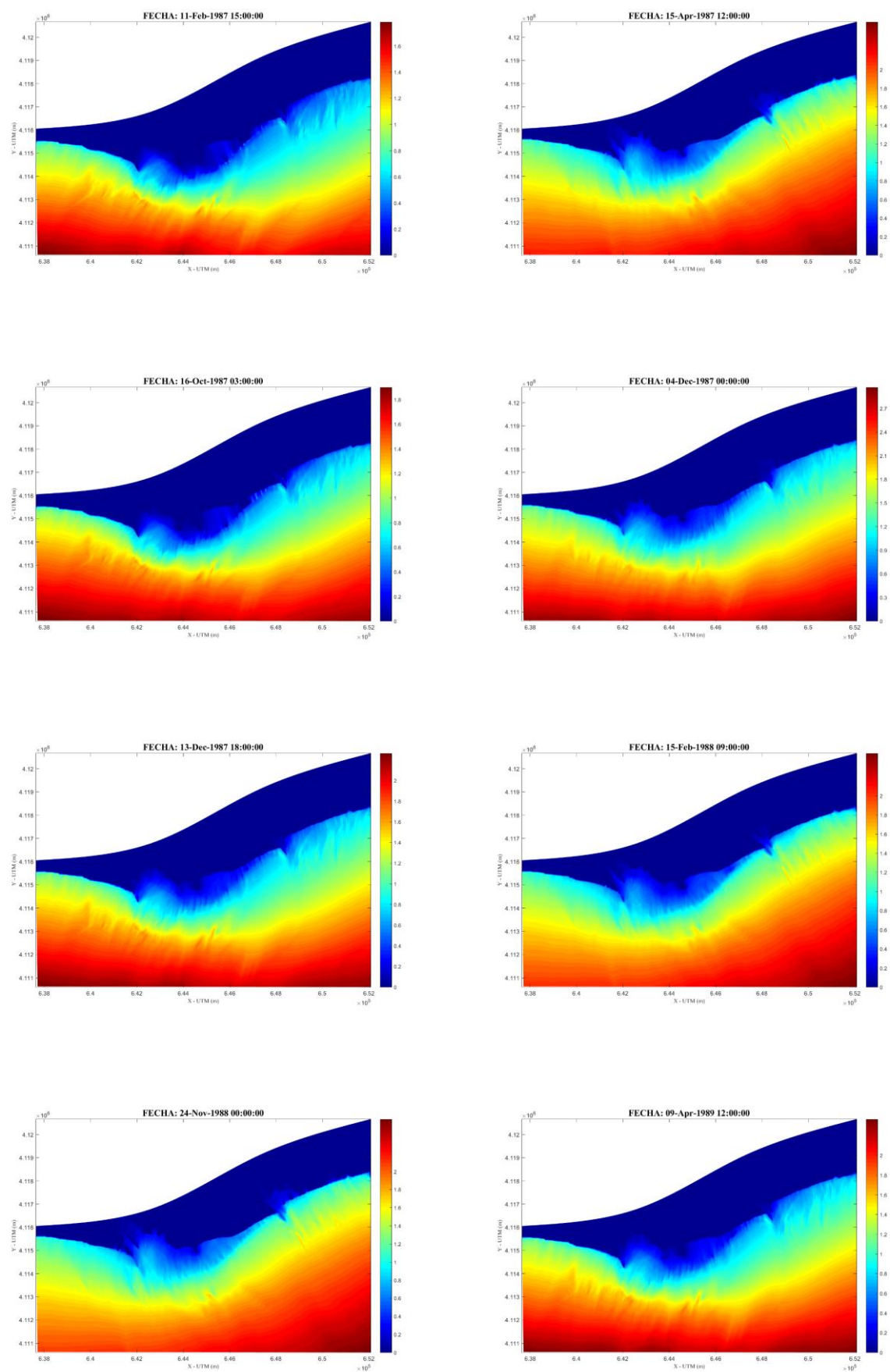


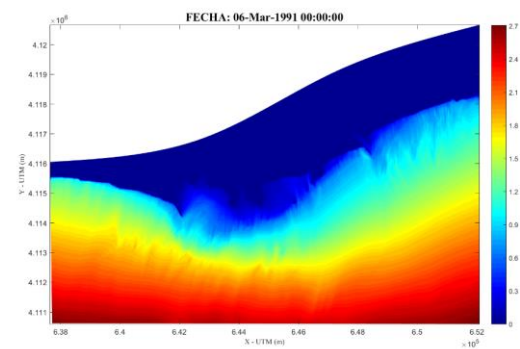
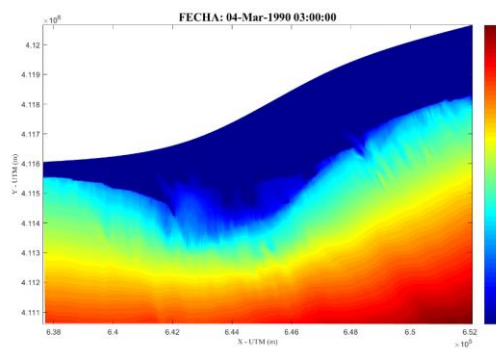
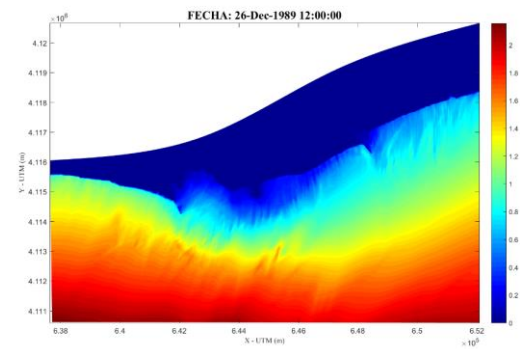
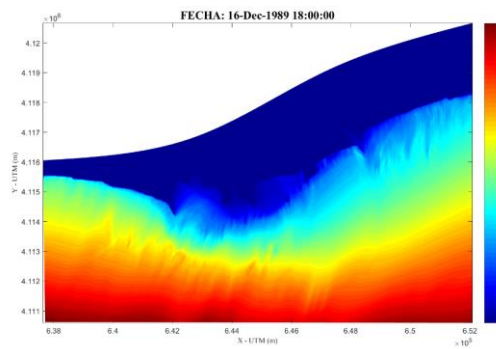
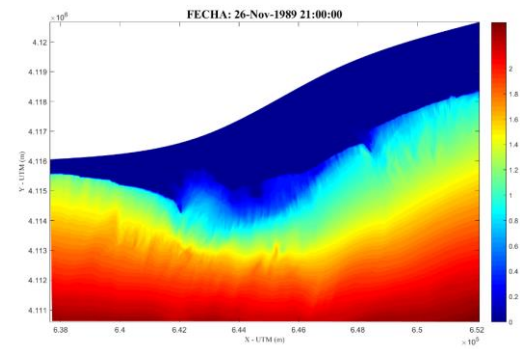
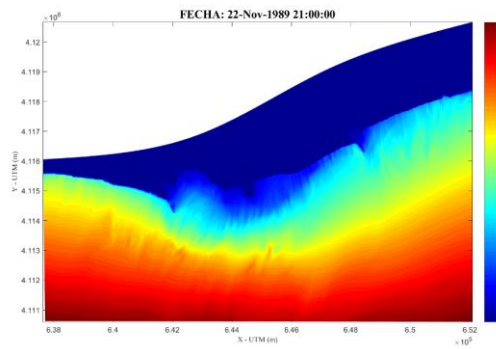
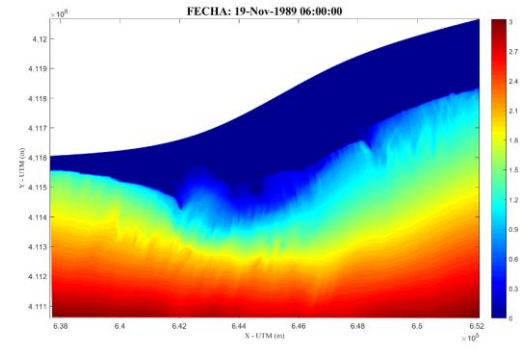
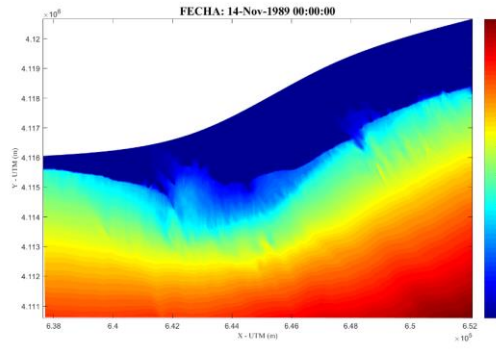


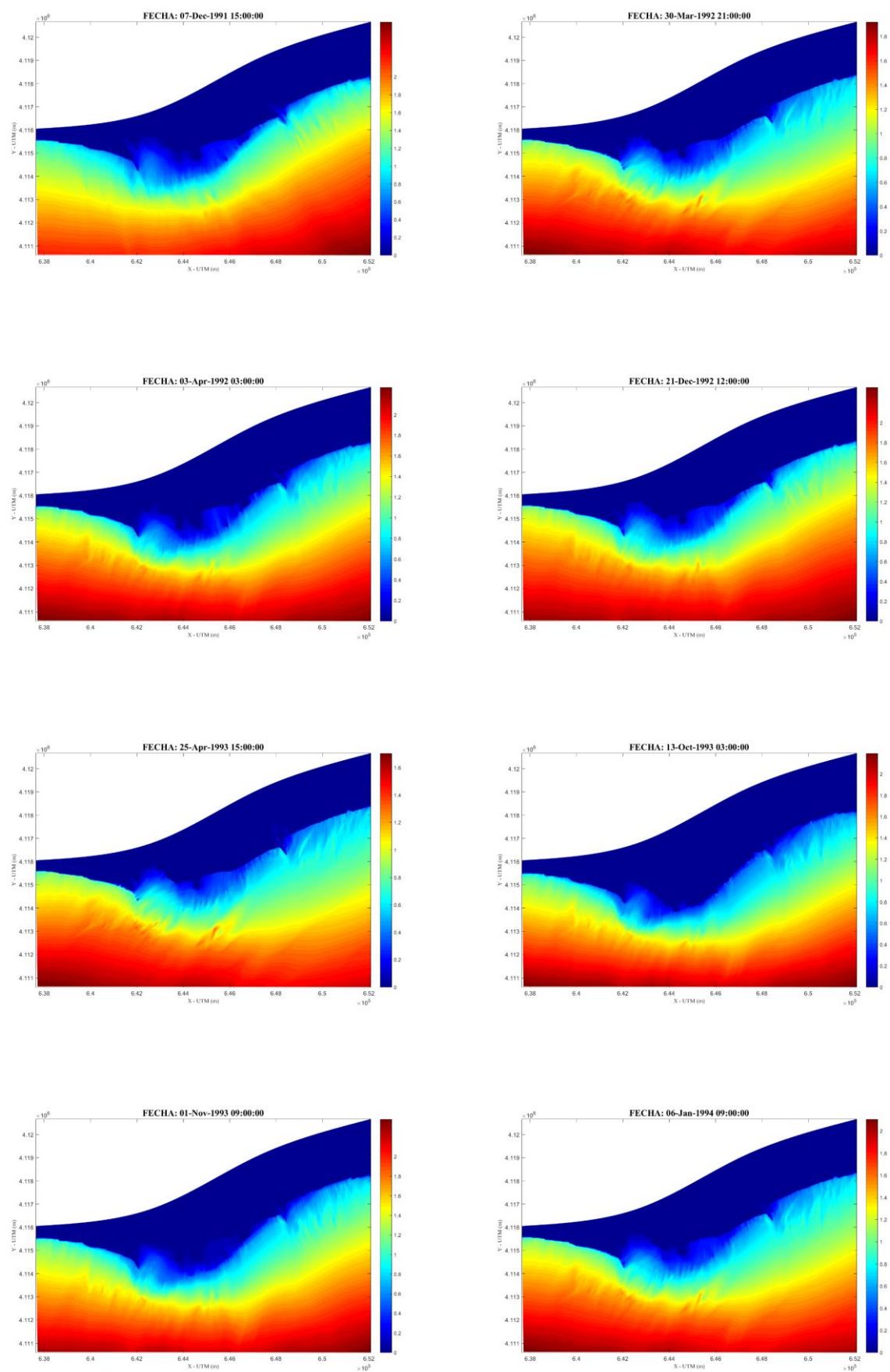




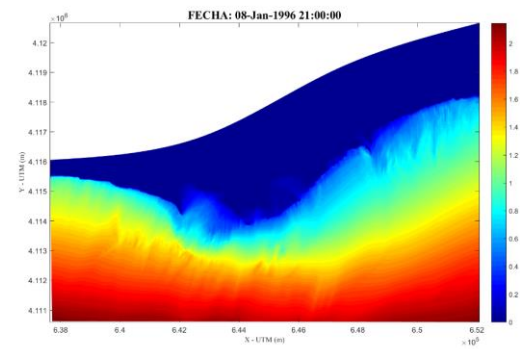
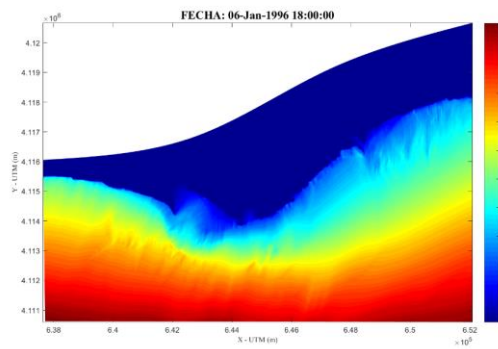
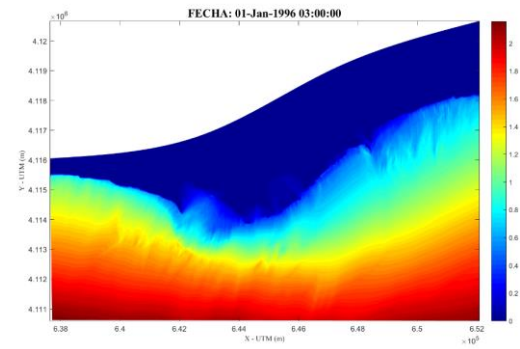
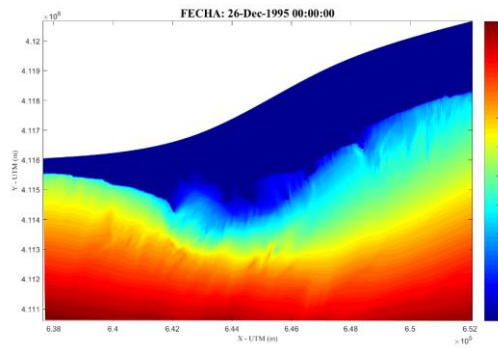
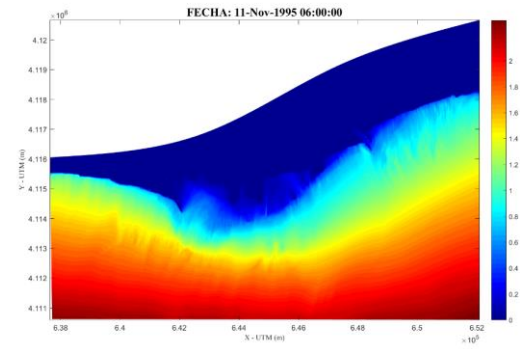
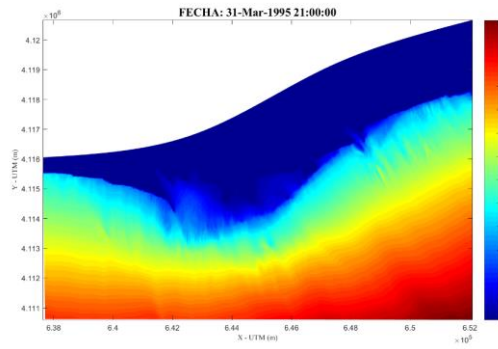
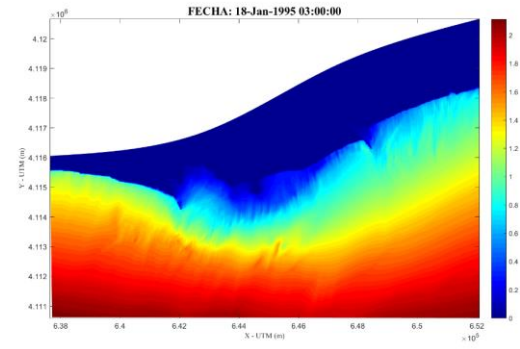
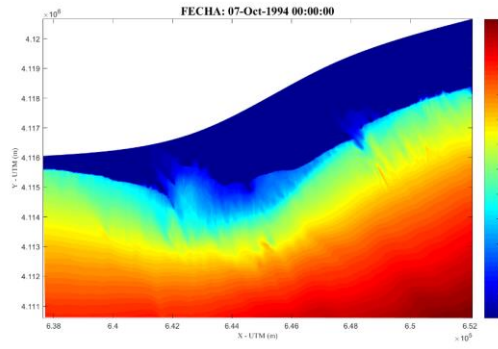


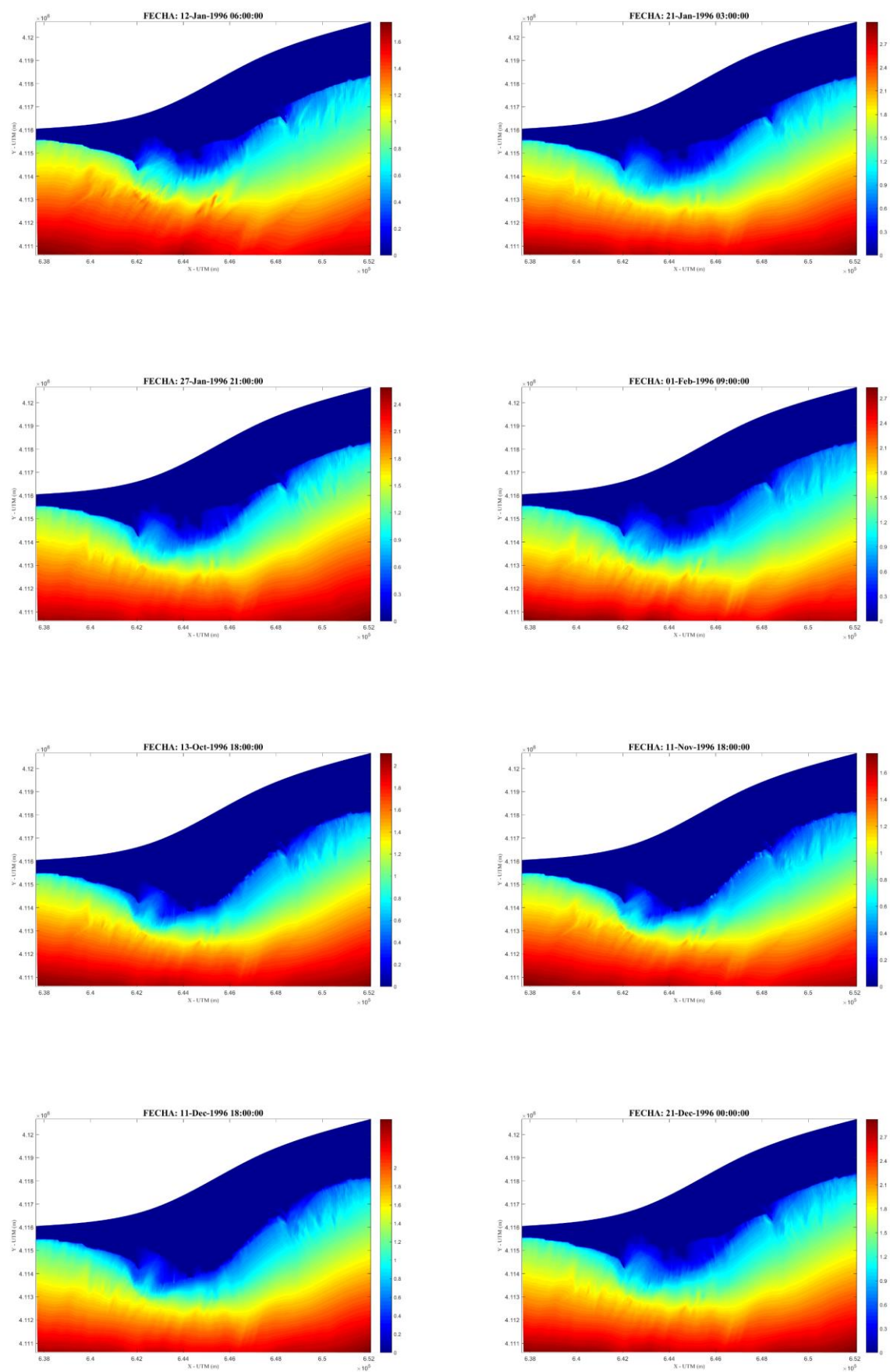


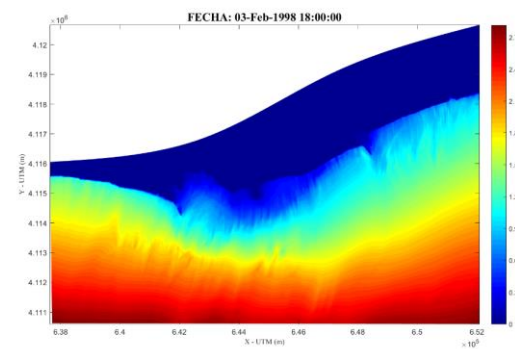
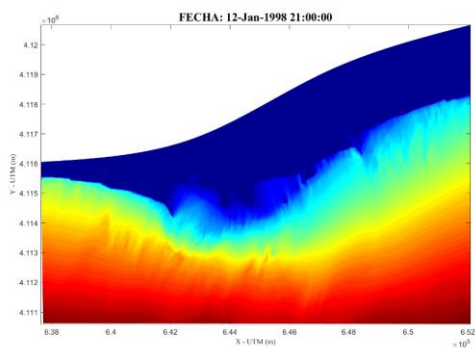
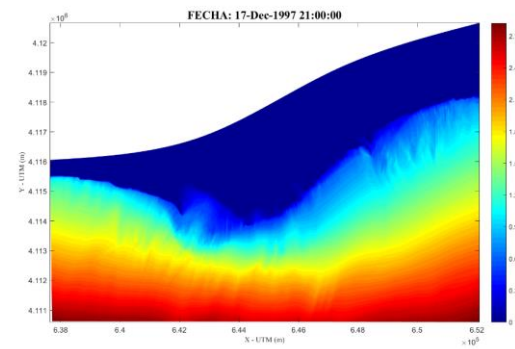
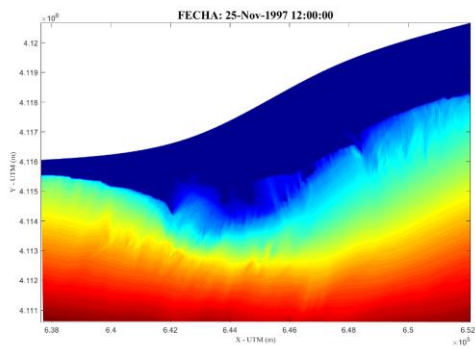
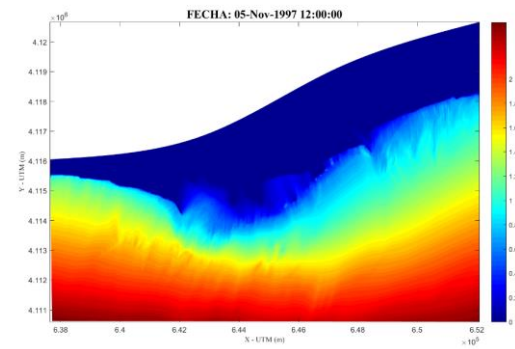
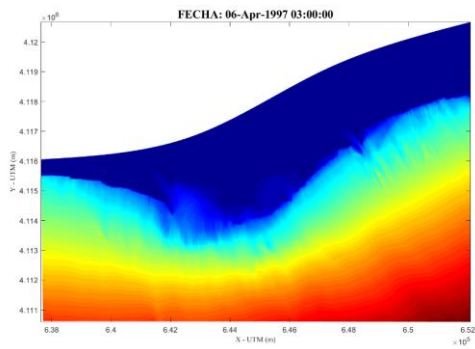
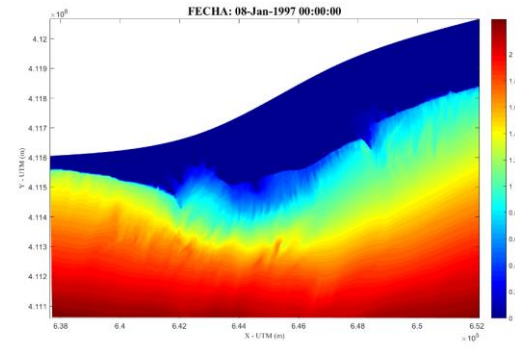
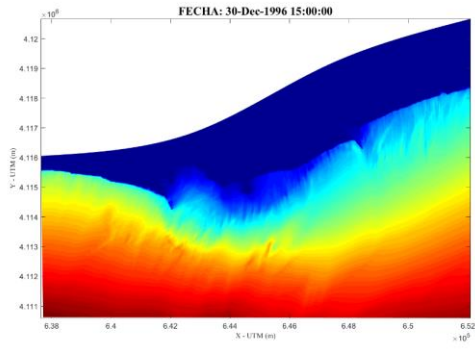


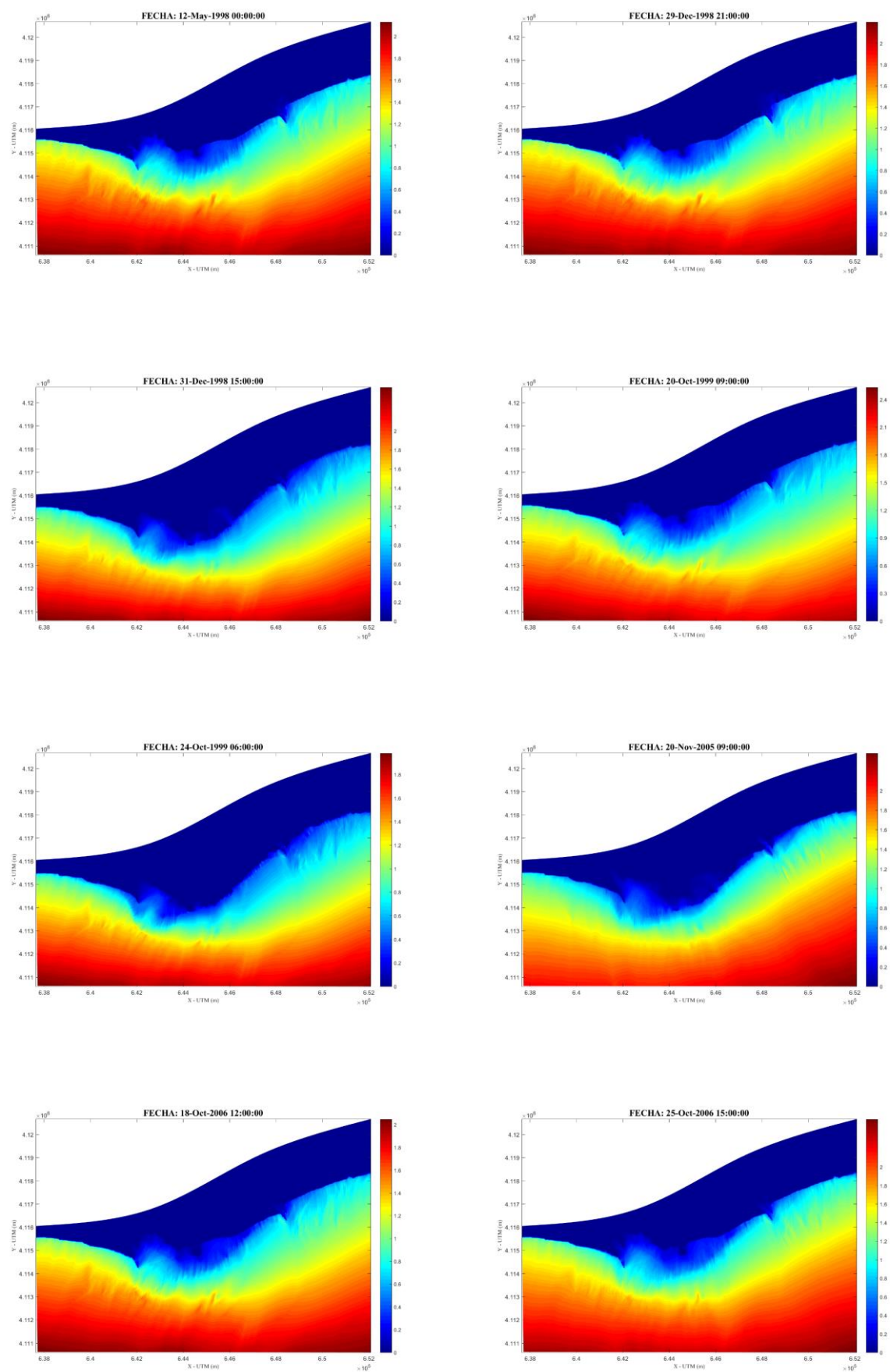




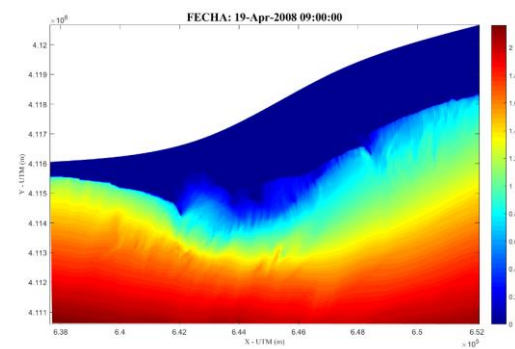
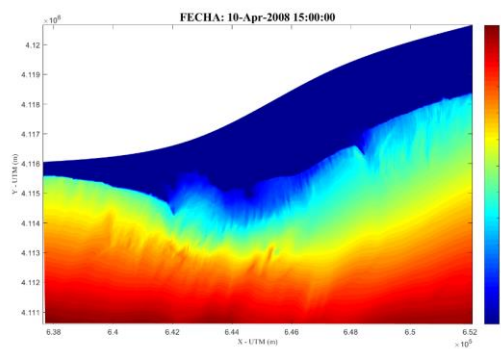
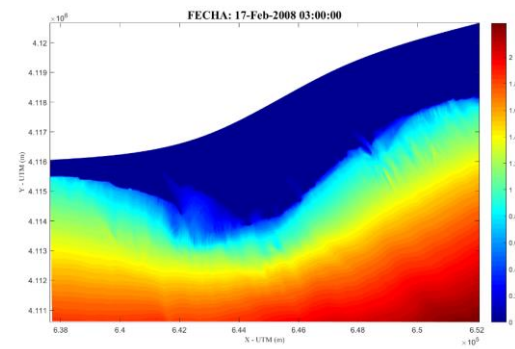
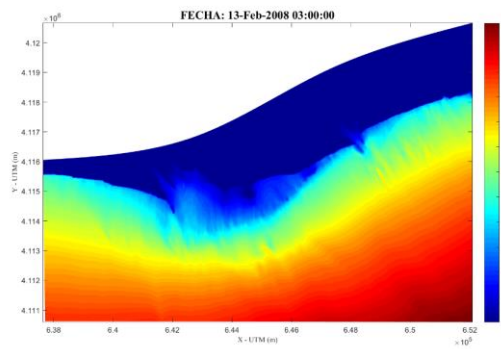
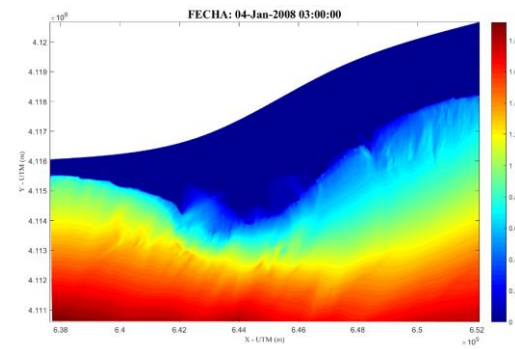
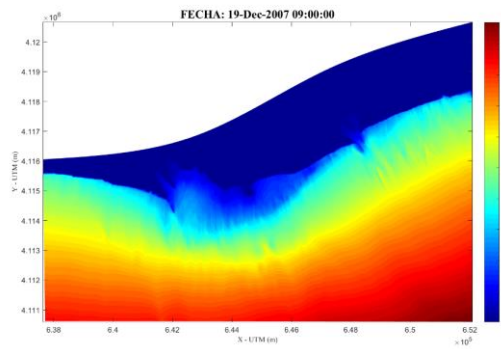
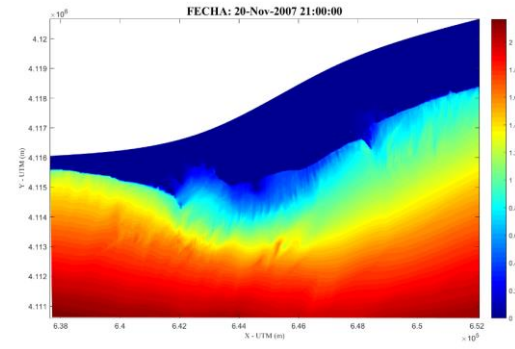
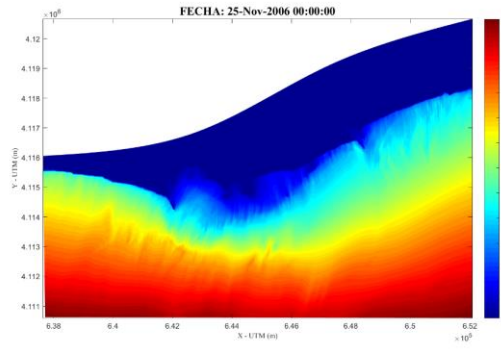


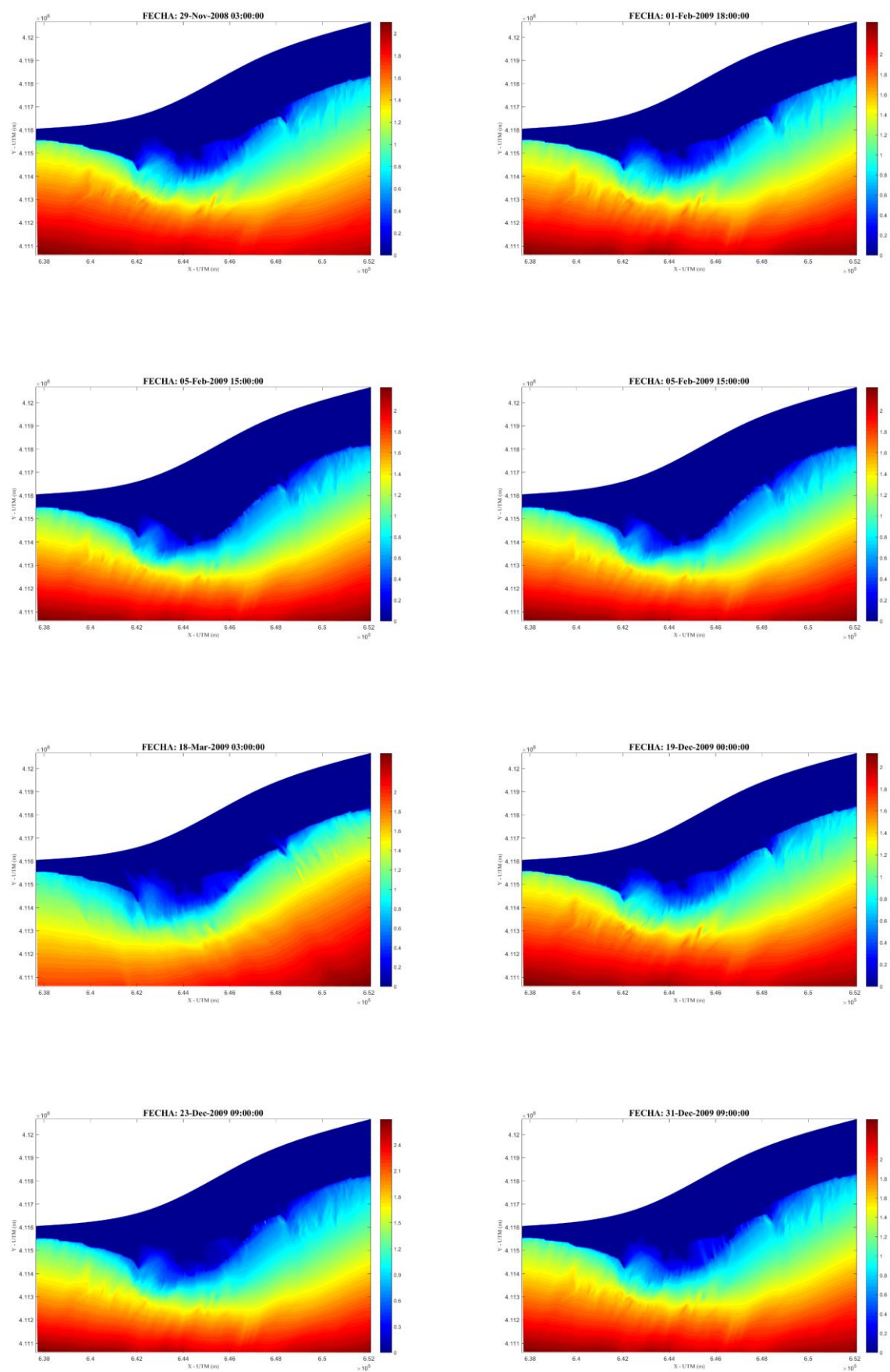




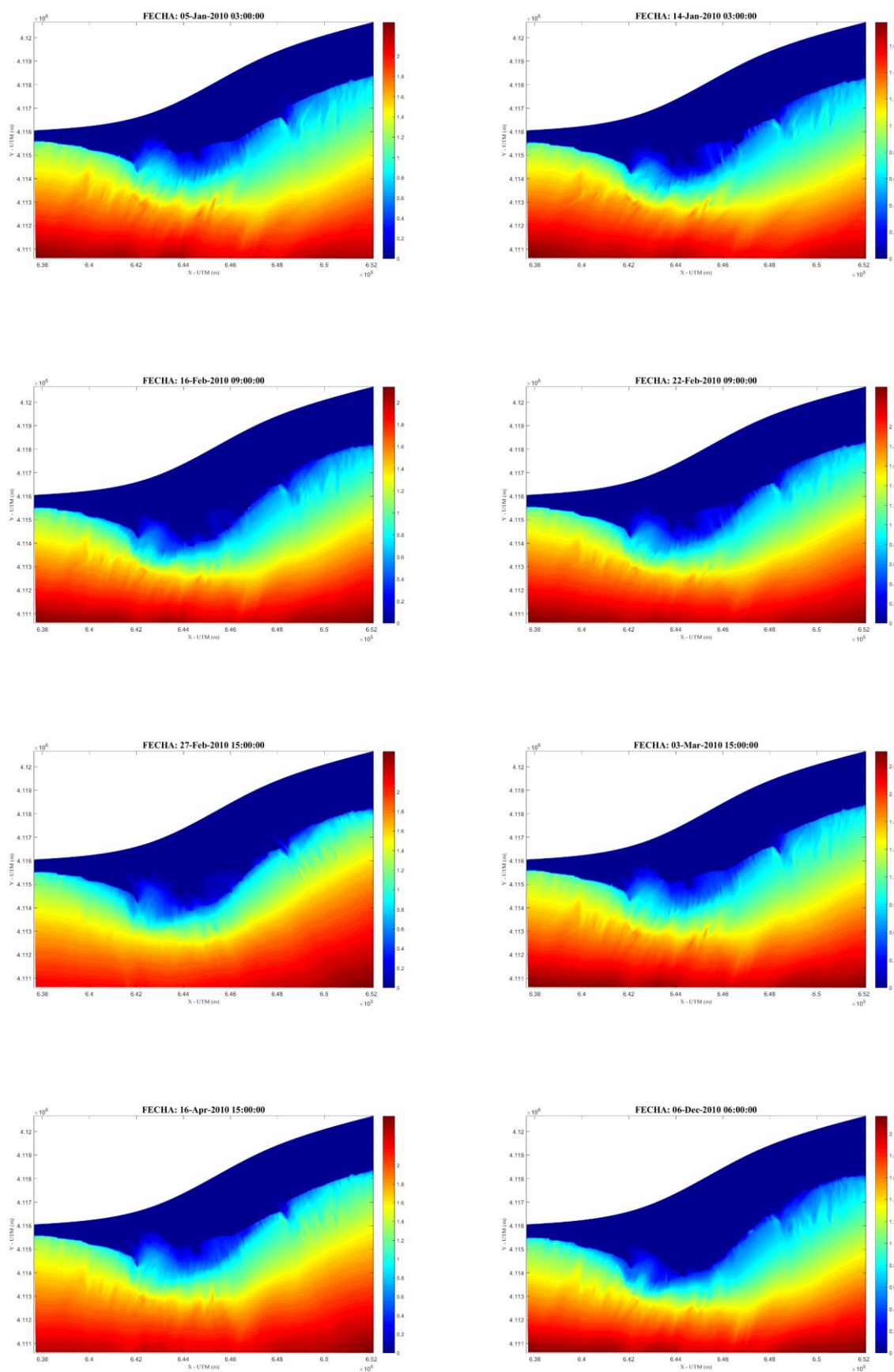


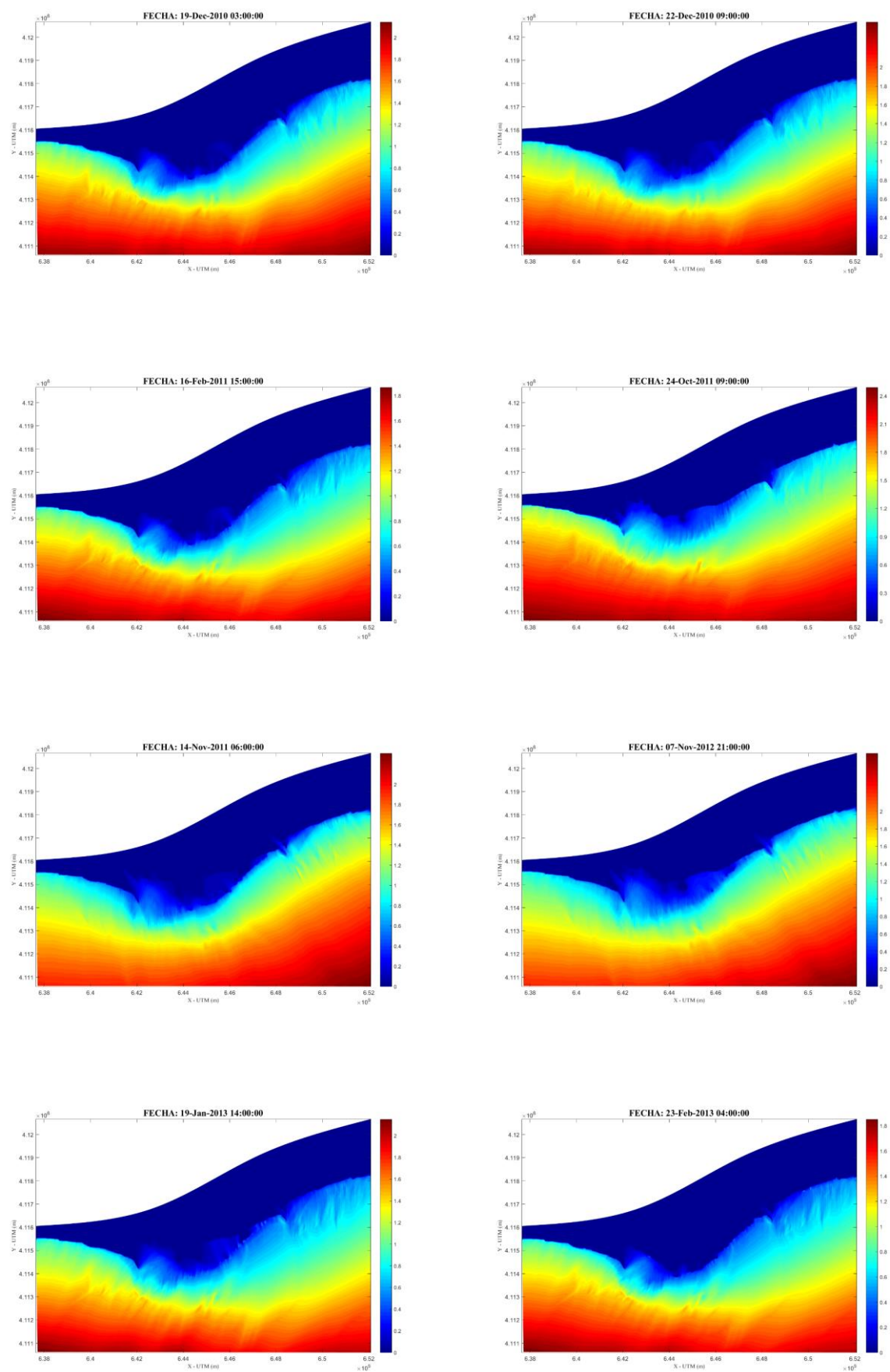




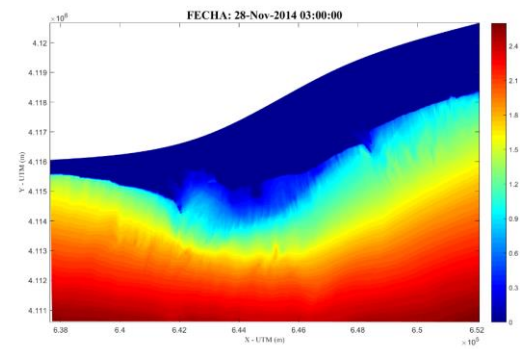
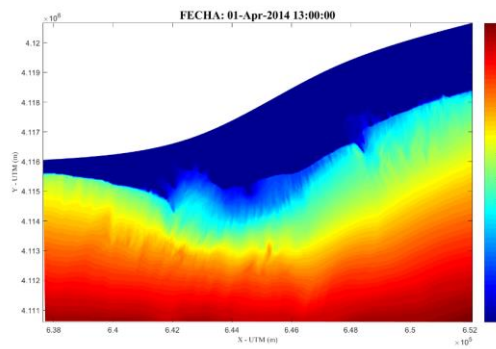
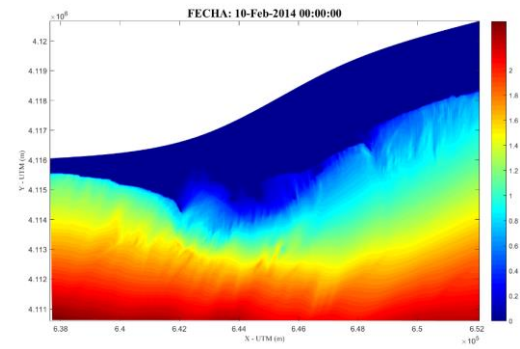
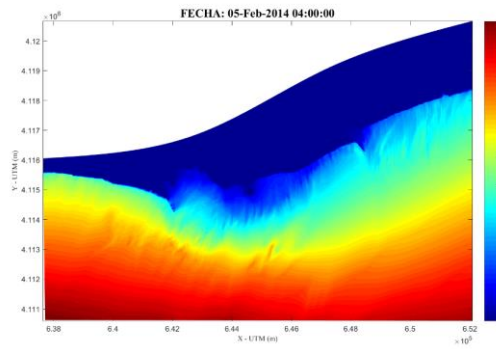
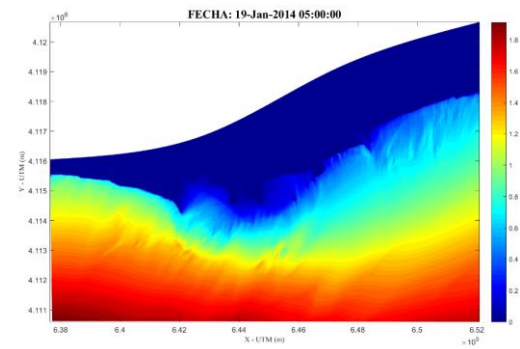
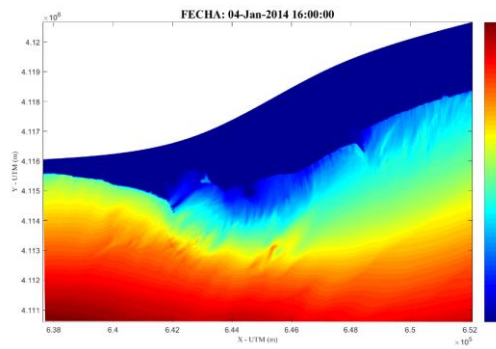
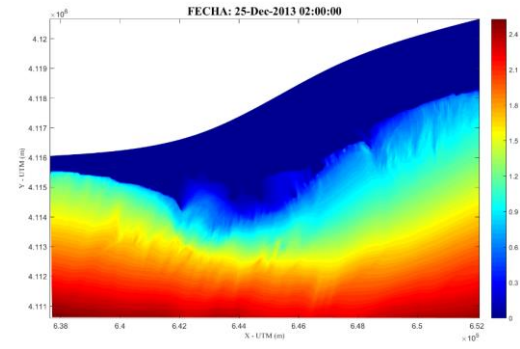
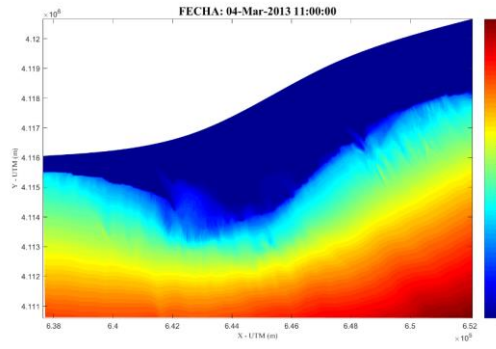


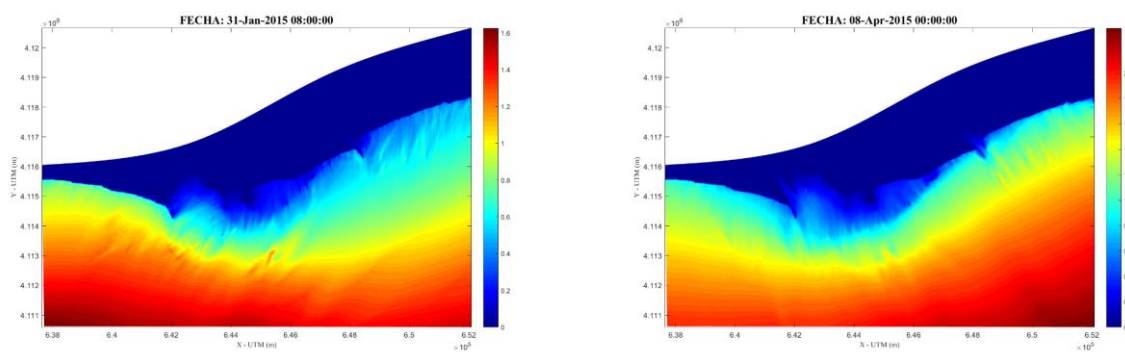
## D.2. Escenario 2











# BIBLIOGRAFÍA

---

- Cáceres Puro, L. M. (1999). *Geomorfología del sector occidental de la Depresión del Guadalquivir (Huelva)*. Huelva: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Huelva.
- Centro de Estudios de Puertos y Costas. (2013). *Estudio de actuación en el tramo de costa comprendido entre las desembocaduras de los ríos Guadiana y Guadalquivir*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid: CEDEX.
- Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. (2014). *Sistema Compartido de Información sobre el Paisaje de Andalucía. Aplicación al Litoral*. Sevilla: Junta de Andalucía.
- Dirección General de Gestión del Medio Natural y Espacios Protegidos. (2018). *Red Natura 2000 - Standard data form - ES6150005 - Marismas de Isla Cristina*. Sevilla: Junta de Andalucía.
- González, R., Dias, J., & Ferreira, Ó. (2001). *Recent Rapid Evolution of the Guadiana Estuary Mouth (Southwestern Iberian Peninsula)*. Faro: Universidade do Algarve.
- Instituto Geológico y Minero de España. (1983). *Hoja 998 MAGNA Ayamonte*. Madrid: Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía.
- Instituto Hidrográfico de la Marina. (1983). *Carta Náutica 441 del Guadiana a la ría de Huelva*. Cadiz.
- Junta de Andalucía. (2010). *REDIAM*. Obtenido de [https://laboratoriorediam.cica.es/VisorRediam/?conf=https://laboratoriorediam.cica.es/visorRediam/visorLitoral/visor\\_litoral\\_4.json](https://laboratoriorediam.cica.es/VisorRediam/?conf=https://laboratoriorediam.cica.es/visorRediam/visorLitoral/visor_litoral_4.json)
- Lesser, G. R., Roelvink, J. A., Van Kester, J. T., & Stelling. (2004). *Development and validation of a three-dimensional morphological model. Coastal Engineering, Vol. 51 No. 8-9, pp. 883–915.*
- Luque del Villar, Á. A., & templado González, J. (2004). *Praderas y bosques marinos de Andalucía*. Sevilla: Consejería de Medio Ambiente.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2013). *Estudio de la dinámica litoral, defensa y propuesta de mejora en las playas con problemas: Estudio de actuación del tramo de costa comprendido entre las desembocaduras de los ríos Guadiana y Guadalquivir*. Madrid: Centro de Estudios de Puertos y Costas.
- Ministerio para la Transición Ecológica. (Junio de 2019). *App Guía de Playas*. Obtenido de <https://www.miteco.gob.es/es/costas/servicios/guia-playas/>
- Morales González, J. A. (2008). *Geología de Huelva, lugares de interés geológico. La desembocadura del Guadiana*. Huelva: Servicio de publicaciones de la Universidad de Huelva.
- Ojeda Zujar, J., & Malvarez García, G. (2005). *Análisis de la Influencia de la Topografía del "Nearshore" en la Evolución Morfodinámica de la Desembocadura del Guadiana*. Las Palmas de Gran Canaria.
- Olabarrieta, M., Warner, J. C., & Kumar, N. (2011). *Wave-current interaction in Willapa Bay. Journal of Geophysical Research: Oceans, 116(C12).*
- Puertos del Estado. (2019). *Puertos del Estado*. Obtenido de [www.puertos.es/es-es/oceanografia](http://www.puertos.es/es-es/oceanografia)
- Rojas Ramos, G. (2018). *Evolución morfodinámica de la costa de Isla Canela*. Sevilla: Universidad de Sevilla.